

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Eugen Kalanj-Matković**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Eugen Kalanj-Matković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se na mentorstvu, stručnoj pomoći, literaturi i savjetima prof. dr. sc. Darku Landeku prilikom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj majci Olji i cijeloj svojoj obitelji na pruženoj moralnoj podršci i savjetima.

Također se zahvaljujem svim profesorima, asistentima, kolegama i prijateljima koji su mi pomogli tijekom studija i upotpunili moje studentske dane.

Eugen Kalanj-Matković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
 inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **EUGEN KALANJ MATKOVIĆ** Mat. br.: 0035190590

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje oštrice spiralnih svrdla prevučениh tvrdim PACVD prevlakama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of spiral drills cutting edge coated with hard PACVD coatings**

Opis zadatka:

Spiralna svrdla primjenjuju se za bušenje i proširivanje provrta u različitim materijalima. Primjena tvrdih prevlaka može smanjiti trošenje svrdla i povećati trajanje oštrice između dvaju brušenja. U radu treba opisati procese trošenja u tribosustavu „spiralno svrdlo - metalni obradak“ i mogućnosti povišenja otpornosti na trošenje svrdla primjenom postupka plazmom potpomognutog kemijskog prevlačenja iz parne faze (PACVD).

U eksperimentalnom dijelu rada treba odrediti kemijski sastav i mehanička svojstva brzoreznog čelika od kojeg su izrađena spiralna svrdla dostupna u trgovačkoj mreži i nabavljena za pokuse prevlačenja. Na ispitnim uzorcima izabranog proizvođača istih dimenzija i oblika oštrice treba provesti pokuse PACVD prevlačenja prevlakama TiN, TiN/TiCN i TiN/TiBN. Predložiti izvedbu i provesti pokus ispitivanja otpornosti na trošenje prevučениh i ne prevučениh svrdla tijekom bušenja provrta u nelegiranom niskougljičnom konstrukcijskom čeliku.

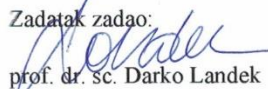
Na temelju analize rezultata ispitivanja odrediti povećanje trajnosti prevučениh svrdla i preporučiti optimalnu prevlaku.

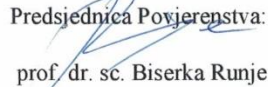
U radu navesti korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:  
  
 prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:  
  
 prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. OBRADA ODVAJENJEM ČESTICA.....	2
2.1. Sustav alat-obrađak .....	2
2.2. Zahtjevi na svojstva alatnih materijala.....	4
3. OBRADA PROVRTA .....	6
3.1. Bušenje.....	6
3.2. Razvrtavanje.....	7
3.3. Bušenje.....	7
3.4. Urezivanje navoja .....	8
4. TROŠENJE .....	9
4.1 Vrste trošenja materijala .....	10
4.1.1 Adhezija .....	10
4.1.2 Abrazija .....	11
4.1.4 Tribokorozija.....	12
4.1.5 Oksidacija.....	12
4.1.6 Difuzija.....	13
4.2 Parametri trošenja .....	13
4.3 Prijenos topline kod obrade odvajanjem čestica .....	14
5. BUŠENJE MATERIJALA .....	17
5.1 Zahtjevi na izbor materijala svrdla.....	17
5.2 Svrdlo .....	19
5.2.1 Spiralno svrdlo .....	19
5.2.2 Proračun modela bušenja .....	21
5.2.3 Svrdla sa izmjenjivim vrhom, pločicama i glavom .....	23
5.2.3.1 Svrdla sa izmjenjivim vrhom .....	23
5.2.3.2 Svrdlo s izmjenjivim reznim pločicama .....	24
5.2.3.3 Svrdlo s izmjenjivom glavom .....	25
5.3 Duboko bušenje.....	25
5.3.1 BTA postupak .....	26
5.3.2 Bušenje topovskim svrdlom.....	27
5.3.3 Ejektorsko bušenje provrta .....	28

6	PRIMJENA POSTUPAKA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA.....	29
6.1	Postupci modificiranja površina.....	30
6.1.1	Mehaničko modificiranje .....	30
6.1.2	Toplinsko modificiranje .....	30
6.1.3	Toplinsko-kemijsko modificiranje .....	30
6.2	Postupci prevlačenja površina.....	30
6.2.1	Toplinska prevlačenja .....	31
6.2.2	Mehanička prevlačenja .....	31
6.2.3	Toplinsko-mehaničko prevlačenje .....	31
6.3	Prevlačenja u parnoj fazi.....	32
6.3.1	Kemijsko prevlačenje iz parne faze (CVD) .....	32
6.4	PVD postupak .....	38
6.5	PACVD .....	41
6.5.1	Uređaj za postupak PACVD .....	42
7	PRIPREMA POKUSA TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA .....	44
7.1	Plan pokusa .....	44
7.2	Modeliranje sustava svrdlo-obradak .....	46
7.3	Simulacija eksperimentalnih uvjeta .....	47
7.4	Provedba ispitivanja.....	49
8	REZULTATI.....	51
8.1	Analiza kemijskog sastava svrdla .....	51
8.2	Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala.....	51
8.3	Određivanje debljine prevlake .....	53
9	REZULTATI TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA .....	55
9.1	Trošenje oštrice svrdla nakon pet izbušenih provrta.....	55
9.2	Trošenje oštrice svrdla nakon deset izbušenih provrta .....	57
9.3	Rezultati nakon petnaest provrta.....	59
9.4	Diskusija rezultata trošenja .....	63
10.	ZAKLJUČAK.....	69
	LITERATURA.....	70

## POPIS SLIKA

Slika 1	Shematski prikaz općeg tehničkog sustava "alat-obrađak" [1] .....	3
Slika 2	Kvalitativna usporedba svojstava alatnih materijala [1] .....	5
Slika 3	Bušenje materijala [4] .....	6
Slika 4	Razvrtavanje materijala [4] .....	7
Slika 5	Istokarivanje [4] .....	8
Slika 6	Urezivanje navoja [4] .....	8
Slika 7	Shematski prikaz kontakta između dva kruta tijela [5] .....	9
Slika 8	Adhezijsko trošenje [6] .....	10
Slika 9	Abrazijsko trošenje [6] .....	11
Slika 10	Faze umora površine [6] .....	12
Slika 11	Faze u uhodavanju reznih alata [12] .....	13
Slika 12	Parametri trošenja oštrice materijala [10] .....	14
Slika 13	Prijenos topline obrađak - alat [8] .....	14
Slika 14	Dijagram ovisnosti tvrdoće o porastu temperature [8] .....	18
Slika 15	Spiralno svrdlo s koničnom drškom [8] .....	19
Slika 16	Spiralno svrdlo za aluminij [9] .....	19
Slika 17	Sile rezanja na svrdlu [10] .....	20
Slika 18	Svrdlo s izmjenjivim vrhom [11] .....	23
Slika 19	Svrdlo s izmjenjivim reznim oštricama [11] .....	24
Slika 20	BTA postupak dubokog bušenja [14] .....	26
Slika 21	„TechniDrill“ sustav bušenja topovskim svrdlom [15] .....	27
Slika 22	Ejektorsko bušenje [17] .....	28
Slika 23	Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja [21] .....	29
Slika 24	Shematski prilaz modificiranja površine [21] .....	30
Slika 25	Shematski prikaz prevlačenja površina [21] .....	31
Slika 26	Sistematizirana podjela prevlačenja površine [22] .....	32
Slika 27	Ovisnost slobodne energije i temperature [21] .....	33
Slika 28	Faze CVD postupka [23] .....	34
Slika 29	Shematski prikaz postrojenja za prevlačenje CVD postupkom [21] .....	35
Slika 30	Shematski prikaz CVD postupka i dodatne toplinske obrade [21] .....	36
Slika 31	Dijelovi prevučeni PVD postupkom [25] .....	39
Slika 32	Shematski prikaz taloženja PVD [21] .....	40
Slika 33	Shematski prikaz rada PACVD [23] .....	42
Slika 34	PACVD uređaj RUBIG GmbH Type PC 70/90 .....	45
Slika 35	Model sustav „svrdlo-obrađak“ .....	46
Slika 36	Stupna bušilica PBD-40 [30] .....	47
Slika 37	Ispitivana svrdla .....	49
Slika 38	Umjereni mikrometar .....	49
Slika 39	XRD analiza osnovnog materijala svrdla .....	51
Slika 40	Tvrdomjer Insize ISH-MR150-U .....	52
Slika 41	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	53
Slika 42	Rubna zona s TiN prevlakom .....	53
Slika 43	Rubna zona s TiN/TiCN prevlakom .....	54
Slika 44	Rubna zona s TiN/TiBN prevlakom .....	54
Slika 45	Dijagram trajanja bušenja 1. do 5. provrta za svrdlo 4 mm .....	55

Slika 46	Dijagram trajanja bušenja 1. do 5. provrta za svrdlo 6 mm .....	55
Slika 47	Dijagram trajanja bušenja 6. do 10. provrta za svrdlo 4 mm .....	59
Slika 48	Dijagram trajanja bušenja 6. do 10. provrta za svrdlo 6 mm .....	59
Slika 49	Prikaz vršnih kutova svrdala nakon 15 izbušenih provrta.....	61
Slika 50	Dijagram trajanja bušenja 11. do 15. provrta za svrdlo 4 mm .....	61
Slika 51	Dijagram trajanja bušenja 11. do 15. provrta za svrdlo 6 mm .....	62
Slika 52	Dijagram smanjenja srednjeg promjera za 4 mm svrdlo .....	63
Slika 53	Dijagram smanjenja srednjeg promjera za 6 mm svrdlo .....	63
Slika 54	Dijagram promjene temperature za 4 mm svrdlo .....	64
Slika 55	Dijagram promjene temperature za 6 mm svrdlo .....	64
Slika 56	Dijagram trajanja bušenja za 4 mm svrdlo .....	65
Slika 57	Dijagram trajanja bušenja za 6 mm svrdlo .....	65
Slika 58	Promjena jakosti struje za bušenje provrta svrdlom promjera 4 mm .....	66
Slika 59	Promjena jakosti struje za bušenje provrta svrdlom promjera 6 mm .....	66
Slika 60	Potrošnja električne energije za bušenje provrta svrdlom promjera 4 mm .....	67
Slika 61	Potrošnja električne energije za bušenje provrta svrdlom promjera 6 mm .....	67



## POPIS TABLICA

Tablica 1	Vrijednosti konstanti materijala <b>Cy</b> , x, y, m u jednadžbi (6)[8] .....	22
Tablica 2	Vrijednosti $K_0$ za $1/d > 2,5$ [8] .....	22
Tablica 3	Vrste CVD postupaka [21] .....	37
Tablica 4	Parametri PACVD procesa [20] .....	42
Tablica 5.	Parametari prevlačenja PACVD TiN/TiCN .....	45
Tablica 6	Izgled vrha ispitivanih spiralnih svrdla prije početka trošenja.....	50
Tablica 7	Udio elemenata u osnovnom materijalu svrdla .....	51
Tablica 8	Rezultati izmjerene tvrdoće .....	52
Tablica 9	Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon pet izbušenih provrta .....	56
Tablica 10	Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon deset izbušenih provrta.....	58
Tablica 11	Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon petnaest izbušenih provrta.....	60
Tablica 12	Rezultati ispitivanja svrdla HSS .....	70
Tablica 13	Rezultati ispitivanja svrdla TiN.....	71
Tablica 14	Rezultati ispitivanja svrdla TiN/TiCN .....	72
Tablica 15	Rezultati ispitivanja svrdla TiN/TiBN .....	73
Tablica 16	Promjena dimenzija ne prevučenog svrdla promjera 4 mm (HSS) .....	74
Tablica 17	Promjena dimenzija ne prevučenog svrdla promjera 6 mm (HSS ) .....	74
Tablica 18	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN 4 mm.....	74
Tablica 19	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN 6 mm.....	74
Tablica 20	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiCN 4 mm.....	74
Tablica 21	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiCN 6 mm.....	75
Tablica 22	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiBN 4 mm.....	75
Tablica 23	Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiBN 6 mm.....	75
Tablica 24	Konstantne vrijednosti tijekom ispitivanja.....	75

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
-------------	---------------------

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$V_c$	m/s	Brzina rezanja materijala
$V_f$	m/s	Brzina posmaka alata
$a_p$	m/s	Dubina rezanja materijala
$F$	N	Sila
$G$	N	Gravitacijska sila
$\mu$	-	Sila trenja
HV	-	Mjerenje tvrdoće po Vickers-u
HRC	-	Mjerenje tvrdoće po Rockwell-u
$T$	K	Temperatura
$D$	mm	Promjer
$Z$	mm	Korak oštrice
$N$	mm/min	Broj okretaja svrdla
$d_{sr}$	Mm	Srednji promjer svrdla
$F_N$	N	Normalna komponenta sile
$F_T$	N	Tangencijalna komponenta sile
VB	mm	Širina trošenja stražnje površine alata
$B$	Mm	Širina rezne oštrice
$Q_{uk}$	W	Ukupna toplina sustava
$Q_{def}$	W	Deformacijska toplina
$F_{cp}$	N	Glavna sila rezanja
$F_{fp}$	N	Posmična sila
$F_p$	N	Pasivna sila
$F_t$	N	Sila trenja
$F$	mm	Posmak
$l_1$	mm	Usmjeravajući dio svrdla
$l_2$	mm	Drška
$l_3$	mm	Radni dio svrdla

## **SAŽETAK**

Razvojem industrije i napretkom sveukupnog društva javlja se i potreba za razvojem novih tehnologija, odnosno poboljšavanje postojećih. Obrada odvajanjem čestica jedna je od najzastupljenijih metoda u proizvodnji nekog stroja. Daljnjom podjelom dolazimo do mnogih drugih, a bušenje materijala je upravo jedna od njih.

PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition) trenutno je jedna od najmodernijih metoda nanošenja tankih tvrdih prevlaka na osnovni materijal. Najčešća primjena ove tehnologije je za nitriranje, boriranje, karbonitriranje i nitrokarburiranje alatnih čelika. Usporedbom nekoliko uzoraka na koje su nanese razne kombinacije prevlaka ovom tehnologijom ispitat će se njihova otpornost na trošenje u jednakim uvjetima rada, utvrditi koja ima najbolju primjenu u povećanju površinske tvrdoće spiralnog svrdla i najduži eksploatacijski vijek trajanja.

Rezultati su pokazali kako postoji razlika između ne prevučenih i prevučenih svrdala. Najveće trošenje rezne oštrice se javilo kod ne prevučenog svrdla, dok je najslabije trošenje rezne oštrice na svrdlu sa TiN/TiBN koje se prikazalo adekvatan izbor za ispitivane uvjete trošenja alata.

Ključne riječi: otpornost na trošenje, PACVD, spiralno svrdlo, bušenje materijala

## **SUMMARY**

With the development of industry and the progress of the overall society there is a need for the development of new technologies, such as improvement of existing ones. Partitioning is one of the most widely used techniques in creating a machine. By further division we come to many others, and drilling materials is just one of them.

PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition) is currently one of the most modern methods for applying thin hard coatings to the base material. The most common application of this technology is for nitrating, boroning, carbonizing and nitrocarburizing of tool steel. By comparing several samples to which various combinations of coatings have been applied by this technology, their resistance to wear under equal conditions will be examined, to determine which is best applied in increasing the surface hardness of the spiral drill and the longest operating life.

The results showed that there is a difference between non-coated and coated spindles. The highest wear of the cutting blade occurred with non-coated drill bits, while the worst wear of the TiN / TiBN cutting blade was found to be an adequate choice for the tested tool wear conditions.

**Key words:** wear resistance, PACVD, spiral drill, cutting tools, drilling materials

## **1. UVOD**

Bušenje rupa i provrta jedna je od najzastupljenijih obrada u i izradi konstrukcijskih dijelova i alata. U njoj se primjenjuju različiti oblici svrdla, upuštala i razvrtala s reznim oštricama opterećenim na sličan način. Početak bušenja ili pred bušenja rupa i provrta uobičajeno se izvodi sa spiralnim svrdlima, a nastavak je sa specifičnim oblicima svrdla i ostalih bušućih alata. U radu će se ispitivati trošenje spiralnih svrdla tijekom bušenja čelika bez pred bušenja. Ovakvo početno bušenje uzrokuje najveća mehanička naprezanja i najintenzivnije trošenje reznih oštrica svrdla. Za produljenje vremena između dva oštrenja svrdla uobičajeno se primjenjuju tvrde prevlake. Nanošenjem optimalne kombinacije prevlaka na određeno svrdlo korišteno u određenim uvjetima rada može se višestruko povećati trajnost u odnosu na ne prevučeno svrdlo što uvelike smanjuje troškove rada, održavanja i skraćuje trajanje bušenja.

U radu će se opisati sustav alat - obradak, utjecaj mehanizama trošenja na rezne oštrice u eksploataciji. Bit će opisane i objašnjene tehnologije obrade provrta, pri čemu će se opisati tehnologija bušenja, te navesti neke od najpoznatijih. Teorijski dio završit će se kompletiranjem poglavlja vezanog za poboljšavanje površinske tvrdoće gdje će se opisati suvremeni postupci pri čemu će se najviše obratiti pozornost na PACVD tehnologiju.

U eksperimentalnog dijelu izvršit će se prevlačenje svrdla jednoslojnim i višeslojnim prevlakama. Nakon toga izvršit će se ispitivanja trošenja ne prevučenih i prevučenih svrdla, u ponovljivim uvjetima. Iz analize i diskusije rezultata ispitivanja predložit će se prikladna prevlaka za ispitivani materijal obratka i uvjete obrade.

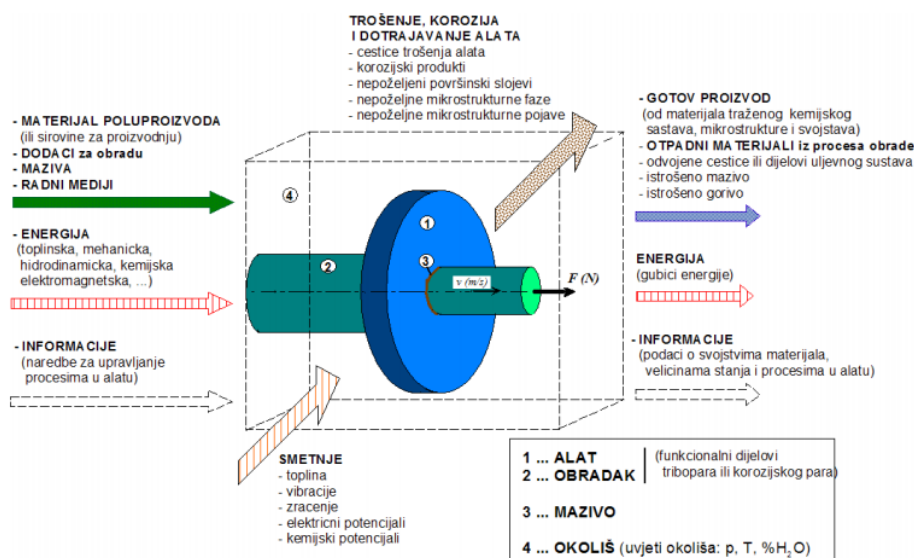
# **TEORIJSKI DIO**

## 2. OBRADA ODVAJENJEM ČESTICA

Danas se u proizvodnji, pogotovo u serijskoj masovnoj proizvodnji velika pozornost obraća na postupke izrade. Sam postupak izrade uvelike uvjetuje troškove proizvodnje nekog proizvoda. Početak proizvodnje kreće određenim tijekom. Najčešće je to od polazne sirovine (sirovac), nakon kojeg slijedi određena pred obrada na neki oblik, zatim u idućem koraku u većini slučajeva je obrada odvajanjem čestica, završna obrada, sklapanje dijelova u sklopove i pakiranje. U daljnjem poglavlju detaljnije će biti opisan upravo sustav alat-obradak koji spada u početni segment obrade odvajanja čestica.

### 2.1. Sustav alat-obradak

Prilikom postupka obrade materijala u sustavu "alat-obradak" istovremeno se pojavljuje niz faktora vezanih za prijenos tvari, energije ili informacija. Volumen obratka i njegova površina obuhvaća se prijenos mase obrađivanog materijala, dok se na radnim površinama alata u dodiru s obratkom odvija značajan prijenos mase pomoćnih tvari (maziva, sredstava za hlađenje i dr.). S alata na obradak ostvaruje se prijenos gibanja i energije (mehaničke, elektromagnetske, toplinske) kao i prijenos određenih informacija (veličina procesa i veličina stanja). Svi gore navedeni procesi prijenosa mogu biti prema sustavu "alat-obradak" ili od njega.



Slika 1 Shematski prikaz općeg tehničkog sustava "alat-obradak" [1]



## 2.2. Zahtjevi na svojstva alatnih materijala

Temeljni zahtjevi za sve vrste alata, pa time i za alatne materijale jesu [1]:

1. Otpornost na trošenje
2. Žilavost (visoki udarni rad loma)

Posebni zahtjevi :

1. Zakaljivost i prokaljivost
2. Otpornost na popuštanje (toplinska stabilnost)
3. Postojanost dimenzija
4. Otpornost na oksidaciju
5. Otpornost na koroziju

Proizvodni zahtjevi :

1. Obradivost (odvajanjem čestica)
2. Sposobnost poliranja površine
3. Cijena materijala

Alati se dijele na dvije skupine kada je u pitanju radna temperatura:

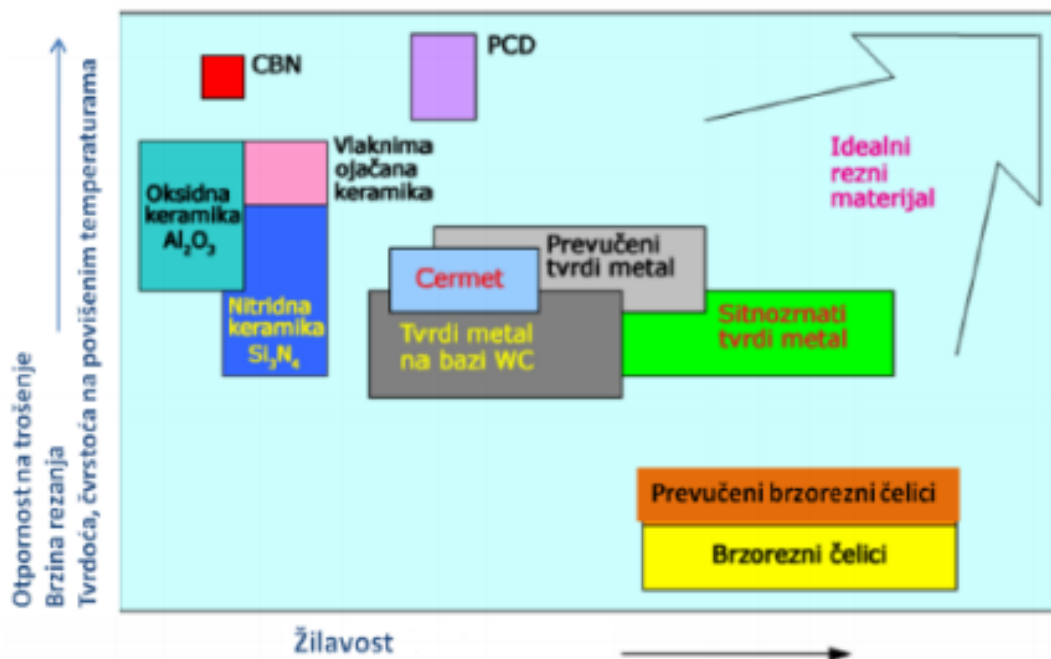
- Alati za hladni rad ( $\vartheta < 200^{\circ}\text{C}$ )
- Alati za topli rad ( $\vartheta > 200^{\circ}\text{C}$ )

Alat pomoću kojeg se ostvaruju navedeni prijenosni procesi pri tome je izložen složenom pojedinačnom i međusobnom djelovanju mehaničkih, toplinskih, korozijskih i triboloških procesa čiji učinci ovise o [1]:

- alatnom materijalu
- obrađivanom materijalu
- konstrukciji i karakteristikama alata
- vrsti i parametrima obrade
- okolišu u kojem se alat koristi.

Trošenje radnih površina alata nastaje uslijed djelovanja sljedećih jednog ili više tipova oštećenja površine [1]:

1. Promjena mikrostrukture i svojstava površine (starenje, očvršćivanje, nepoželjne strukturne pretvorbe),
2. Plastična deformacija površinskog sloja (uz promjenu oblika i mjera i zaostala naprezanja)
3. Površinske pukotine (zbog umora materijala od mehaničkih i/ili toplinskih procesa),
4. Procesima trošenja površine alata (skidanjem materijala),
5. Procesima navarivanja i naljepljivanja obrađivanog materijala ili pomoćnih tvari na površinu
6. Korozijskim oštećenjem alata.



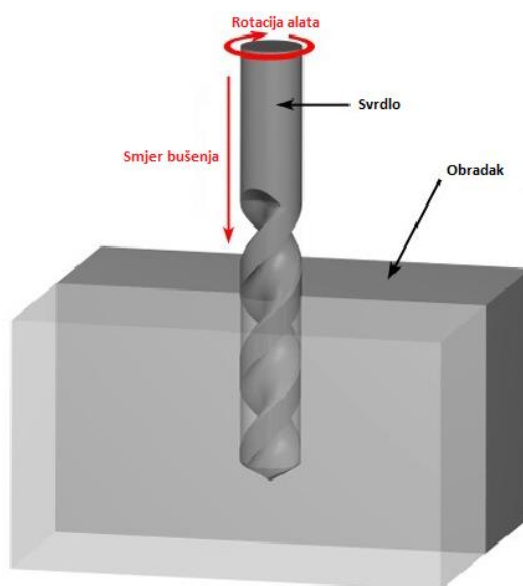
Slika 2 Kvalitativna usporedba svojstava alatnih materijala [1]

### 3. OBRADA PROVRTA

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanje) materijala čija je primjena za izradu provrta manjih promjera ili proširivanje na provrte većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima bušilicama, ali je moguće istu radnju izvoditi i na tokarilicama ili glodalicama. Ukoliko se bušenje izvodi bušilicama, glavno gibanje je pridruženo alatu i vrsta je rotacijsko gibanje, dok pomoćno gibanje može biti pridruženo ili alatu ili obratku, ovisno o vrsti bušilice ali vrsta je uvijek translacijsko gibanje. Alat za bušenje je svrdlo koje posjeduje definiranu geometriju reznog dijela oštrice, Ima dvije glavne rezne oštrice i jednu poprečnu oštricu koja se proteže po obodu. [3]

#### 3.1. Bušenje

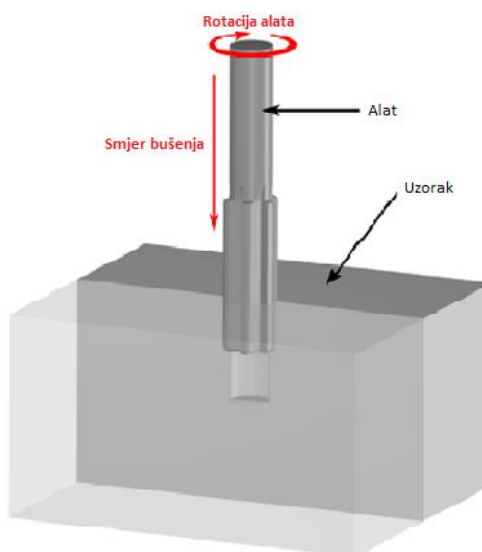
Danas je jako široka primjena tehnologije bušenja. Koristi se od prehrambene pa sve do vojne industrije. Bušenje je operacija rezanja provrta pomoću rotirajućeg alata zvanog bušilica. Prije samog procesa bušenja, središte provrta se određuje na radnom komadu. Izvučene su dvije linije pod pravim kutom koje se trebaju podudarati. Središnja točka služi za označavanje središnje linije početka bušenja. Rotirajuća bušilica se pritisne na središnju točku koja je pozicionirana na radnom komadu kako bi se dobila rupa. Bušenje ne stvara precizan provrt. Procesom bušenja stvara se samo gruba unutarnja površinu. Rupa je malo veća od promjera svrdla koji se koristi, a nastaje zbog vibracija bušilice u radu. [4]



**Slika 3** Bušenje materijala [4]

### 3.2. Razvrtavanje

Razvrtavanje je postupak obrade odvajanjem čestica materijala koji se većinom koristi poslije bušenja za dobivanje preciznije i finije obrade već gotovih provrta, a najviše do klase obrade N5. Najčešće se izvodi na alatnim strojevima, bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno i kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja su dodijeljena alatu. Alat za razvrtavanje je obično razvrtalo, definirane geometrije reznog dijela, s više od dvije glavne rezne oštrice. [2]

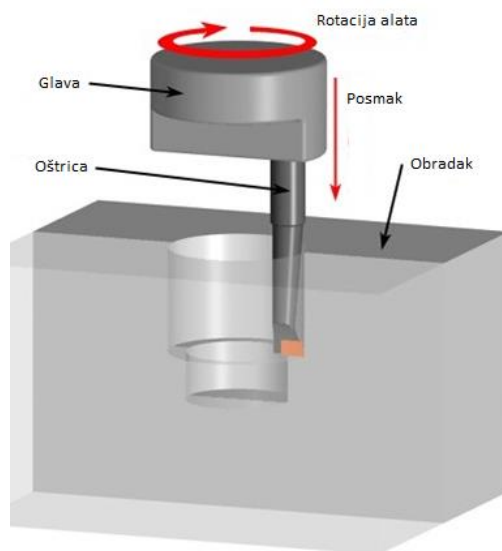


**Slika 4** Razvrtavanje materijala [4]

Razvrtalo ne može bušiti rupu, već jednostavno slijedi provrt prethodno izbušene rupe. Uklanja izrazito mali volumen metala. Širina provrta metala koji se uklanja u razvrtavanju iznosi približno 0,375 mm. U ovom procesu brzina razvrtavanja je pola brzine bušenja. [4]

### 3.3. Istokarivanje

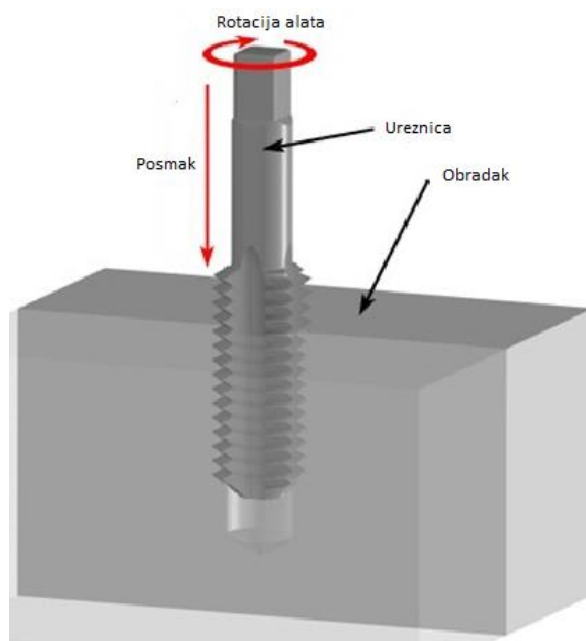
Istokarivanje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava nakon bušenja za dobivanje finije i bolje tolerancije obrađenog provrta. Izvodi se na alatnim strojevima za istokarivanje (tokarilice) ili bušilicama, pri čemu alat vrši glavno, posmično i dostavno gibanje, slika 5. [2]



**Slika 5** Istokarivanje [4]

### 3.4. Urezivanje navoja

Operacija urezivanja navoja se provodi pomoću alata koji se zove ureznica. Njegovom rotacijom u obratku se reže određeni navoj s određenim korakom i točnošću profila. Alat ima oštricu po čitavom obodu čijom rotacijom se reže i oblikuje unutrašnji navoj. [4]



**Slika 6** Urezivanje navoja [4]

## 4. TROŠENJE SVRDLA

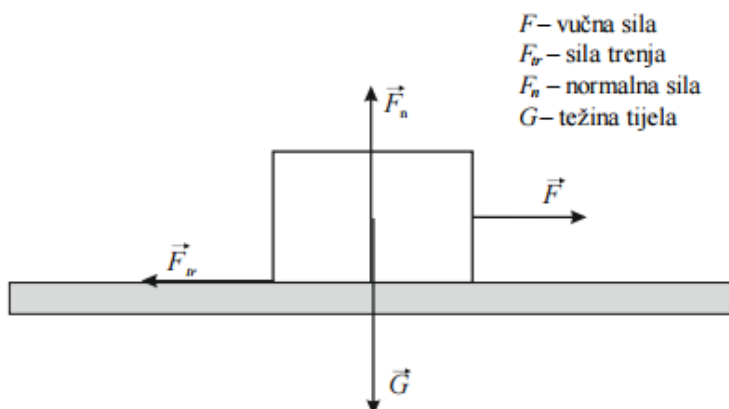
Trošenje je gubitak materijala (jednog ili oba triboelementa), ako postoji međusobni kontakt i relativno gibanje između tih elemenata. [1]

**Tribologija** (grč. *τριβειν*: trljati + -logija), znanstvena disciplina koja proučava zbivanja na površinama dvaju tijela u dodiru ili relativnom gibanju (triboelementi), ponajprije trenje, trošenje materijala i učinke podmazivanja. [5]

Prilikom projektiranja bilo kakvog sustava, ukoliko postoje kontakti među elementima potrebno je obratiti povećanu pozornost upravo na tribosustav i njegove triboelemente. Smanjenjem trenja među elementima moguće je ostvariti znatne uštede i povećati trajnost tijekom eksploatacije.

Vrste trošenja materijala su:

- Adhezija
- Abrazija
- Umor površine
- Tribokorozija
- Oksidacija
- Difuzija



**Slika 7** Shematski prikaz kontakta između dva kruta tijela [6]

#### 4.1. Vrste trošenja materijala

U ovom poglavlju detaljnije su razrađeni pojmovi mehanizma trošenja materijala. Opće gledano svi ti mehanizmi, kao i njihove kombinacije su glavni procesi svakog stroja ili uređaja. Trošenje je prisutno u gotovo svim komponentama koji nas okružuju. Danas postoji mnogo različitih načina trošenja materijala, ali se oni svi gotovo pa mogu svrstati unutar ovih mehanizama:

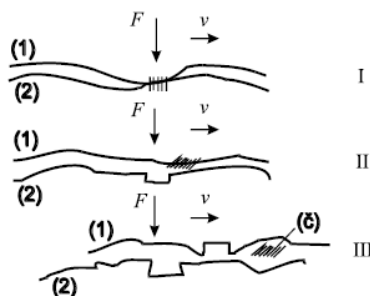
- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija
- Oksidacija
- Difuzija

Svaki od ovih mehanizama stvara svoje specifične tragove trošenja po kojima ga prepoznamo. Također, otpornost materijala za svaki od navedenih mehanizama trošenja zahtjeva uz to različita mehanička svojstva. Osim tih osnovnih mehanizama prisutne su i neke vrste trošenja:

- Erozija
- Kavitacija

##### 4.1.1. Adhezija

Adhezijsko trošenje opisuje lomljenje čestice materijala s jednog kliznog para i mikro zavarivanje na drugu pri međusobnom gibanju i zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije prikazuje se u tri faze, slika 8. [6]



Slika 8 Adhezijsko trošenje [6]

Faza I - Nastajanje adhezijskog spoja različitih sila jakosti na mjestu dodira izbočina

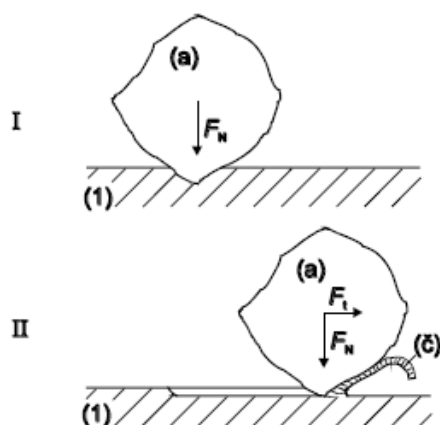
Faza II - Razdvajanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje “zavarena” na jednom članu kliznog para.

Faza III - Otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o eksploataciji i uvjetima rada, a uglavnom je listićast.

#### 4.1.2. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem mekšeg materijala uslijed probijanja tvrdog materijala, a uzrokovano je tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama.

Prikazuje se kao mikro rezanje tvrdim abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, slika 9.



Slika 9 Abrazijsko trošenje [6]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

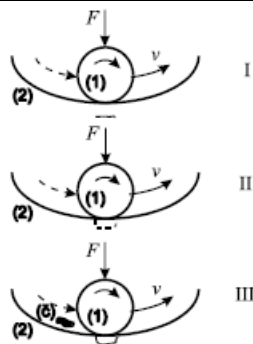
I faza - Prodiranje tvrdog abraziva (a) u površinu mekšeg materijala (1) pod silom normalne komponente opterećenja  $F_N$ .

II faza - Istiskivanje materijala u obliku listića čestice trošenja (č) prilikom djelovanja tangencijalne komponente opterećenja  $F_T$ . [6]

#### 4.1.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed dugotrajnih promjenjivih djelovanja naprezanja. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 10 u tri dijela.





Slika 10 Faze umora površine [6]

Faza I - Stvaranje mikro pukotine, duboko ispod površine materijala

Faza II - Napredovanje mikro pukotine prema površini

Faza III - Ispadanje čestice trošenja, obično listićast oblik ili iverak

U prvoj fazi nastaje pod površinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine djelovanja naprezanja.

U drugoj fazi dolazi do probijanja pod površinske pukotine na površinu. Nakon toga dolazi do konstantnog izbijanja kuglastih čestica na površinu.

U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do odlamanja velike čestice listastog oblika ili oblika iverka, što na površini ostavlja oštećenje i udubinu. Upravo zbog toga se ovaj oblik trošenja najčešće zove pitting (rupičanje). [6]

#### 4.1.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja tijekom kojega najviše dolazi do interakcije kemijske ili elektrokemijske veze materijala sa okolišem.

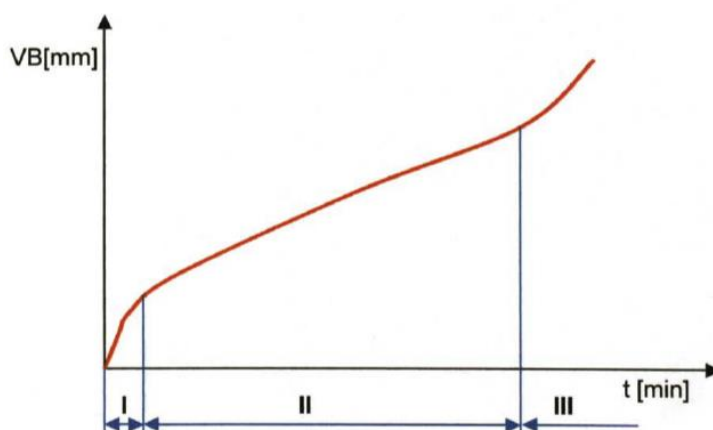
Najbitniji faktor otpornosti na tribokoroziju je kemijska pasivnost materijala za određeni medij. Tribokorozija je u pravilu "poželjan" mehanizam trošenja jer slojevi proizvoda korozije u eksploataciji štite metalne površine od direktnog kontakta dvaju metala. [6]

#### 4.1.5. Oksidacija

Oksidacija je mehanizam trošenja koji nastaje pri povišenim temperaturama u predjelu vrha alata. Taj mehanizam trošenja nema veliki utjecaj na alatne i brzorezne čelike ali uvelike utječe na alate od tvrdog metala bez prevlake gdje na stražnjoj površini nastaju kompleksni W-Co-Fe-oksidi koji se lako troše u obradi te dovode do loma alata u predjelu vrha. [7]

#### 4.1.6. Difuzija

Difuzija je mehanizam trošenja koji nastaje prilikom kod jako velikih brzina rezanja i povišenih eksploatacijskih temperatura na mjestu bušenja i zato se zbog tog procesa razlažu manje stabilne kemijske veze u materijalu alata i obratka. Tijekom bušenja ugljičnog čelika povišenim temperaturama s alatom od tvrdog metala nastaje tipičan primjer difuzijskog trošenja [7].



**Slika 11** Faze u uhadavanju reznih alata [12]

Periodi uhadavanja alata [12]:

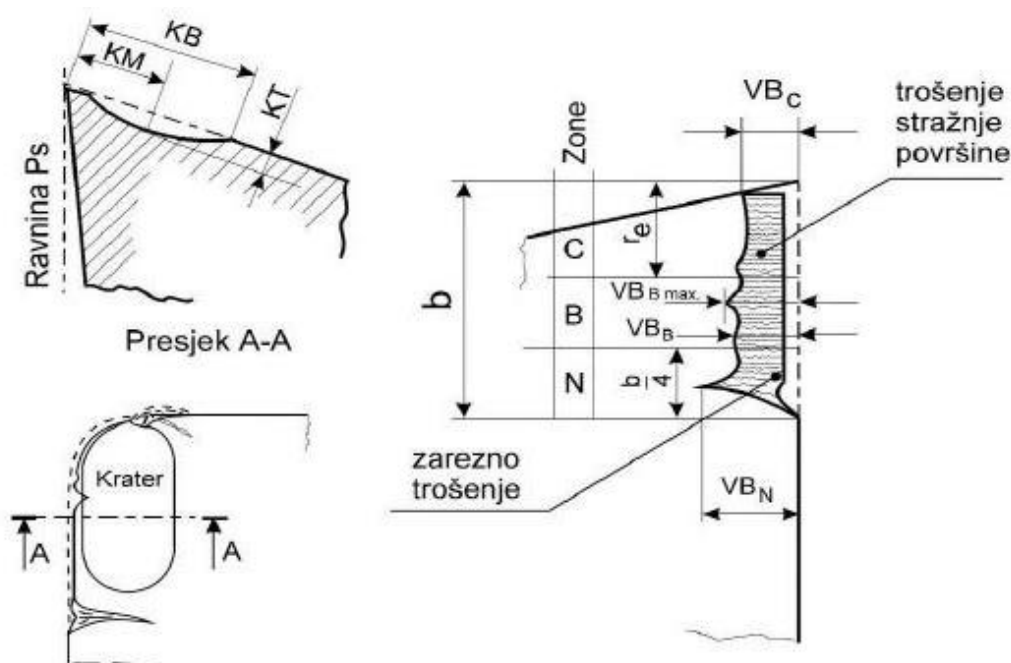
- I. Period uhadavanja – rezna oštrica prilagođava se materijalu obratka, popunjavanje pora, nisko trošenje
- II. Period eksploatacijskog trošenja – vrijeme rada alata, očekivano trošenje oštrice
- III. Period naglog trošenja – veliki porast trošenja i nastanak loma

#### 4.2. Parametri trošenja

Parametri trošenja oštrice materijala jesu slijedeći [13]:

- VB: širina trošenja stražnje površine alata ,
- VB (max): najveća vrijednost širine trošenja stražnje površine alata,
- KT: dubina kratera na prednjoj površini alata,
- KM: udaljenost od oštrice do središta kratera,
- KB: širina kratera.

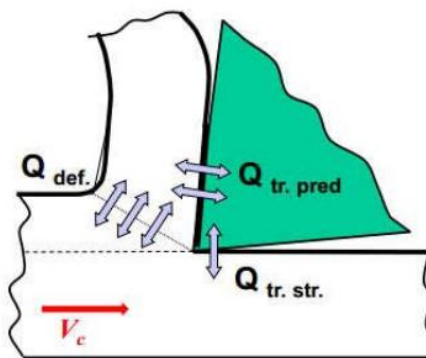
Navedeni parametri trošenja prikazani su na slici 12.



Slika 12 Parametri trošenja oštrice materijala [10]

#### 4.3. Prijenos topline kod obrade odvajanjem čestica

Utrošena energija u prilikom procesa obrade odvajanjem čestica većinom kompletna prelazi u toplinsku energiju. Postotak od dovedene energije oko 20 do 30% odlazi na alat i obradak što uzrokuje njihovo ne željeno zagrijavanje površine. Kod obratka nastaju toplinske deformacije i naprezanja kao i promjena dužinskih mjera i loša kvaliteta obrade, a kod alata brže trošenje površine, povećanje otpora rezanja, vibracije i rast temperature. [7]



Slika 13 Prijenos topline obradak - alat [8]

Glavni uzroci razvoja topline u procesu odvajanja čestica su prikazani na slici 13: plastična deformacija  $Q_{\text{def}}$ , površinsko trenje na mjestu dodira odvojene čestice s prednjom površinom alata  $Q_{\text{tr. pred.}}$  i trenje na kontaktnoj dodirnoj površini obratka sa stražnjom površinom alata  $Q_{\text{tr. str.}}$ . Toplina koja nastaje u procesu prenosi se na odvojenu česticu, obradak, alat, okolnu sredinu i SHIP (sredstvo za hlađenje i podmazivanje), ako se on koristi (1).

$$Q_{uk} = F * v * t = Q_{\text{def}} + Q_{\text{tr}} \quad (1)$$

Količina generirane topline u zoni obrade ekvivalentna je samoj brzini rezanja i čistom vremenu obrade ili radu deformiranja kao i procesu trenja na prednjoj i stražnjoj površini alata. [8]

#### 4.4. Suvremeni rezni materijali

##### 4.4.1. Cermeti

Cermet (metal-keramika) je tvrdi metal koji ima sastav tvrde faze od 70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 30% TiC, TiN, TiC+TiN, NbC, a vezanu fazu (matrix) od Ni, Co ili Mo. Radi se o keramici putrudiranoj u metalnoj veznoj fazi. Otkriveni su je 1950. godine, a njihova komercijalna upotreba počela je 1970. godine. Dobiva se sintetiziranjem i kemijski je stabilan, ne reagira s okolišem. Posjeduje visoku toplinsku čvrstoću, otpornu rezu oštricu i visoku otpornost na trošenje te nisku sklonost adheziji prema čeliku. Cermeti su se promaknuli zbog dobre žilavosti u područje tvrdih metala. Primarna upotreba je za fino i srednje tokarenje, kao i glodanje čelika ili čeličnog lijeva s visokim brzinama rezanja gdje posjeduje svojstva sličnim tvrdim metalima. [7]

##### 4.4.2. Rezna keramika

Razlika između rezne keramike i tvrdog metala je ta što se kod rezne keramike ne nalazi metalna vezna faza. Eksploatacijska temperatura iznosi oko 1400 °C što je idealno za rezne materijale. Osnovni razlog zbog kojeg rezna keramika nije brzo prihvaćena u obradi je njena krhkost što alat čini lako lomljivim. Zbog toga se istraživanja kod rezne keramike

usmjeravaju na poboljšavanje žilavosti. Prilikom obrađivanja reznom keramikom ne koristi se SHIP zbog njene osjetljivosti na promjenu temperature. [7]

#### **4.4.4. Tvrđi metali**

Kao što se vidi iz imena, jedno od najvažnijih svojstava tvrdih metala je tvrdoća. Osim toga glavnog svojstva tvrdi metali odlikuju se jako dobrom žilavošću s kombinacijom tvrdoće posjeduju odlična mehanička svojstva. Posjeduju uz odlična mehanička svojstva i dobru toplinsku vodljivost, te koeficijent toplinskog širenja koji se razlikuju u odnosu na klasične materijale. Glavna svojstva su sljedeća [18]:

- visoko talište i module
- visoka tvrdoća i otpornost na trošenje,
- visok modul elastičnosti,
- korozijska otpornost na povišenim temperaturama,
- dobra postojanost na temperaturne šokove.

#### **4.4.5. Kubični bornitrid (CBN)**

Bornitrid (BN) je kemijski spoj bora i dušika. Sirovi materijal za dobivanje CBN-a je mekana heksagonalna modifikacija bornitrida (h-BN) iz kojeg se sintezom na temperaturi između 1500 i 2000 °C i pri tlakovima od 5 do 9 GPa dobiva kubični bornitrid (CBN). Po tvrdoći je trenutno drugi poznati materijal u svijetu, odmah iza dijamanta. Važna svojstva CBN-a su visoka tvrdoća, odlična vodljivost topline i dobra kemijska postojanost nego. Toplinski je stabilan do 1500 °C. CBN se koristi kao abrazivni materijal. [7]

#### **4.4.6. Dijamant (PCD)**

Dijamant ima samo jedan element, a to je čisti ugljik C i najtvrđi je poznati materijal u svijetu. Tvrđi je oko 5 puta od tvrdog metala i ima do 30 puta veću postojanost. Proizvodi se u oblicima prirodnog i sintetičkog dijamanta. Prirodni dijamant nastao je kroz dugo niz godina sintezom na dubini od 150 do 200 km ispod površine zemlje i prilikom udara meteorita na površinu zemlje. Oko 80% prirodnih dijamanta ima slabiju čistoću i boje te se ne mogu koristiti za proizvodnju nakita, nego većinom za industrijske svrhe. Svojstva prirodnih i sintetičkih dijamanta su približno ista, a mogu biti monokristalni (MCD) i polikristalni (PCD). [7]

## 5. BUŠENJE MATERIJALA

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava prilikom izrade provrta manjih dimenzija ili za proširivanje istih provrta na veće dimenzija te je najviše primjenjivan postupak s udjelom od 20 do 25% u odnosu na druge postupke obrade odvajanjem čestica [7]. Neki od glavnih problema koji se javljaju kod obrade provrta su: iznos brzine rezanja se smanjuje od ruba prema centru alata, problem je odvođenje odvojenih čestica iz zone rezanja, nepovoljna je raspodjela topline u zoni obrade materijala, povećano je trošenje na oštrim rubovima reznog dijela alata i postoji mogućnost stvaranja mikro zavarenih kontakata koji erozijski oštećuju materijal.

Zbog ovih razloga bušenje materijala zahtijeva detaljniju analizu koja će biti obrađena u nastavku ovog rada.

### 5.1. Zahtjevi na izbor materijala svrdla

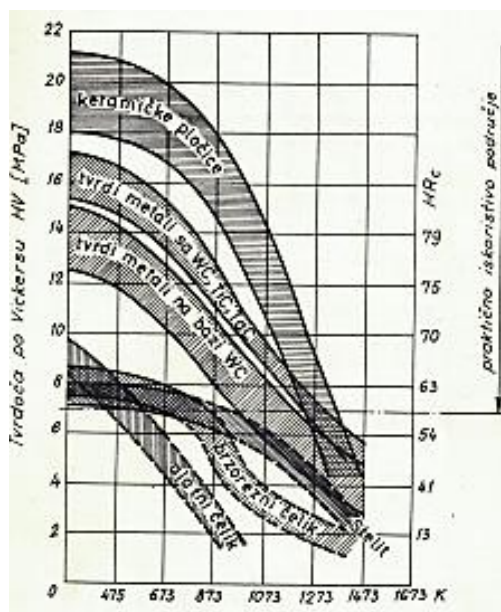
Sa željom i ciljem da se smanji trošenje površine svrdla prilikom rada, te da mu se produlji eksploatacijski vijek mora se detaljno obratiti pozornost na neke zahtjeve [8]:

1. Dovoljna temperaturna izdržljivost
2. Dovoljna čvrstoća i žilavost potrebnu zbog statičkih i dinamičkih naprezanja
3. Veliku površinsku tvrdoću potrebnu zbog zahtjevnih uvjeta rada
4. Ekonomski faktor cijene svrdla

Upravo zbog gore navedenih zahtjeva za njihovu reznu sposobnost, tvrdoću i temperaturnu izdržljivost imamo slijedeće skupine alatnih materijala koje se koriste za izradu svrdala [8]:

1. Legirani i ne legirani alatni čelici
2. Brzorezni čelici
3. Tvrde legure
4. Tvrđi metali
5. Dijamant

Dijagram koji nam najbolje prikazuje ovisnost tvrdoće u odnosu na povećanje temperature je prikazan na slici 14.



**Slika 14** Dijagram ovisnosti tvrdoće o porastu temperature [8]

Prema tome, zbog upravo ovih zahtjeva preporučuju se ove orijentacijske vrijednosti [8]:

1. Legirani i ne legirani alatni čelici:  $t < 570$  K, a brzine odvajanja čestica do  $v = 0,25$  m/s
2. Brzorezni čelici: temp. izdržljivost do  $t = 850 - 950$  K,  $v = 0,42-0,66$  m/s
3. Tvrde legure: temp. izdržljivost  $t = 1100 - 1200$  K,  $v = 1$  m/s
4. Tvrđi metali:
  - a) Na bazi volfram-ovih karbida (WC):  $t = 1150$  K,  $v = 1$  m/s,
  - b) Na bazi volfram-titanovih i tantalovih karbida (WC, TiC, TaC):  
 $t = 1250$  K,  $v = 1,6 - 5$  m/s
5. Sinterirani oksidi (keramičke pločice): temp. izdržljivost  $t = 1450$  K,  $v = 5 - 13$  m/s
6. Dijamant:  $t = 1450 - 1750$  K,  $v = 1 - 50$  m/s

## 5.2. Svrdlo

Svrdlo je rezni alat sa jednom ili više ravnih ili kosih reznih oštrica. Svrdla mogu imati šuplja unutrašnjost tijela u svrhu dovodenja SHIP-a, kao i odvođenje odvojenih čestica i SHIP-a.

Svrdla variraju po geometrijskoj formi, dimenzijama i tolerancijama. Svrdla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih provrta i dubina u širokom rasponu materijala. Spiralno svrdlo, prikazano na slici 15, se sastoji od: [8]

- radne dužine svrdla ( $l_3$ ) koja sadrži spiralne utore a ima rezni i kalibrirajući dio svrdla,
- reznog dijela izbrušenog u konus, tj. kut vrha svrdla ( $2\phi$ ),
- usmjeravajućeg (kalibrirajućeg) dijela ( $l_1$ ) – dio svrdla koji osigurava pravilan smjer svrdla u procesu rezanja,
- drška ( $l_2$ ) – dio svrdla koji služi za pričvršćenje svrdla i prijenos okretnog momenta na svrdlo.



Slika 15 Spiralno svrdlo s koničnom drškom [8]

### 5.2.1. Spiralno svrdlo

Spiralna svrdla su svrdla koja imaju najveću primjenu u industriji, odnosno najčešće su korišteni alati u procesu obrade provrta. Neke od njihovih karakteristika su te da mogu imati jednu ili više reznih oštrica, raznih nagiba i materijala izrade.

Razlikujemo spiralna svrdla s valjkastim i koničnim drškom. [8]



Slika 16 Spiralno svrdlo za aluminij [9]



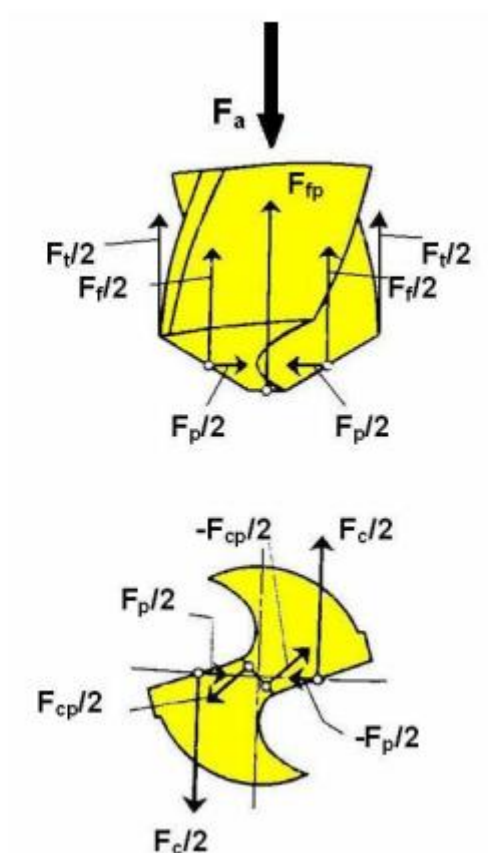
Osnovni dijelovi spiralnog svrdla su [8]:

- prednja i stražnja površina,
- glavna oštrica (spoj prednje i stražnje površine),
- utor za odvođenje čestica i za dovod rashladne tekućine,
- poprečna oštrica.

Sile rezanja oštrice svrdla rastavljaju se na tri komponente:

- Glavnu silu rezanja  $F_{cp}$ ,
- Posmičnu silu  $F_{fp}$ ,
- Pasivna silu  $F_p$ ,
- Sila trenja  $F_t$ .

Glavnu silu rezanja se sastoji od dvije komponente  $F_c$  (za svrdla s dvije oštrice) Isto vrijedi za posmičnu i stražnju silu. Navedene sile rezanja prikazane su na slici 17. [8]



Slika 17 Sile rezanja na svrdlu [10]

### 5.2.2. Proračun modela bušenja

Kut vrha svrdla  $2\phi$  je kut koji zatvaraju dvije glavne rezne oštrice svrdla. Ovaj kut bira se prema materijalu obratka, zato što vrši važan utjecaj na prednji geometrijski kut  $\gamma$ , stražnji geometrijski kut  $\alpha$ , kao i na otpornost jezgre svrdla. S povećanjem kuta  $2\phi$  povećava se i trenje bušenja, temperatura bušenja a sukladno tome povećava se naprezanje samog svrdla na uvijanje i izvijanje.

Kod tvrdih materijala on iznosi:  $2\phi = 120^\circ - 140^\circ$ , a kod mekših materijala (npr. Mg i Cu) je  $2\phi = 80^\circ - 110^\circ$ .

Kut zavojnice svrdla  $\omega$  je kut između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu samog prednjeg geometrijskog kuta  $\gamma$ . Povećavanjem kuta zavojnice  $\omega$  raste i kut  $\gamma$ . Rastom kuta zavojnice poboljšavaju se uvjeti rezanja, smanjuje moment uvijanja, smanjuju naprezanja bušenja i temperatura bušenja.

Korak zavojnice  $\omega$  računa se prema slijedećem izrazu [8] :

$$H = D * \text{ctg} \omega \quad (2)$$

Posmak  $f$  je put koji obavi svrdlo u smjeru unutar materijala za jedan okretaj alata.

$$f = f_z * z \quad (3)$$

Posmična brzina  $v_f$  ili posmak u jedinici vremena računa se preko posmaka  $f$  i broja okretaja svrdla  $n$  :

$$v_f = f * n = f_z * z * n \quad (4)$$

Brzina rezanja  $v_c$  je različita u drugim dijelovima rezne oštrice svrdla. Na centralnoj osi svrdla brzina rezanja je jednaka nuli, a prema obodu raste prema svojoj maksimalnoj vrijednosti. Za brzinu rezanja uvijek se uzima maksimalna brzina, jer ona određuje eksploatacijski vijek trajanja svrdla. Brzina rezanja svrdla računamo prema jednadžbi:

$$v_c = d * \pi * n \quad (5)$$

Prošireni oblik jednadžbe za brzinu rezanja koji uzima u oblik sve parametre izgleda:

$$v_c = \frac{C_v * d^x * k_0}{T^m * f^y} \quad (6)$$

Pri čemu su  $C$ ,  $d$ ,  $x$ ,  $y$  i  $m$  konstante materijala. [8]

U tablici 1 prikazane su vrijednosti konstanti  $C$ ,  $x$ ,  $y$  i  $m$  za neke materijale.

Tablica 1 Vrijednosti konstanti materijala  $C_y$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $m$  u jednadžbi (6)[8]

Materijal obratka	$C_y$	$X$	$y$	$m$
Čelik $\sigma_m = 450\text{MPa}$	11.1	0.4	0.5	0.2
Čelik $\sigma_m = 550\text{MPa}$	9.3			
Čelik $\sigma_m = 650\text{MPa}$	8.0			
Čelik $\sigma_m = 750\text{MPa}$	7.1			
Cr-Ni čelik $\sigma_m = 650\text{MPa}$	6.3			
Cr-Ni čelik $\sigma_m = 750\text{MPa}$	5.6			
Cr-Ni čelik $\sigma_m = 850\text{MPa}$	5.0			
Cr-Ni čelik $\sigma_m = 950\text{MPa}$	4.5			
Lijevano željezo HB170	14.4	0.25	0.4	0.125
Lijevano željezo HB190	12.2			
Lijevano željezo HB210	10.5			

Nadalje u tablici 2 prikazane su vrijednosti konstante  $K_0$  za  $1/d > 2,5$ .

Tablica 2 Vrijednosti  $K_0$  za  $1/d > 2,5$  [8]

$1/d$	$K_0$
2,5	1.0
3-4	0.9 – 0.8
4-5	0.8 – 0.7
5-6	0.7 – 0.65
6-8	0.65 – 0.6
8-10	0.6 – 0.5

### 5.2.3. Svrkla sa izmjenjivim vrhom, pločicama i glavom

Osim spiralnih svrdala postoji i varijanta specijalnih svrdala koji se koriste u nešto drugačijim namjenama. Prilikom bušenja u težim radnim uvjetima ili bušenja sa svrdlima jako visoke cijene došlo se na ideju izmjenjive glave samog svrdla kako prilikom eksploatacije kada dođe do trošenja rezne oštrice ne treba mijenjati čitavo svrdlo, već samo njegov rezni dio. Slično kao i kod tokarskog noža.

#### 5.2.3.1. Svrkla sa izmjenjivim vrhom

Svrkla sa izmjenjivim vrhom i pločicama dostupna su u dimenzijama  $\varnothing 12 - \varnothing 75$  mm i odnosima l/d od 2 do 10. Svrkla sa izmjenjivim vrhom sastoje se od jezgre i izmjenjivog vrha (rezne oštrice), koja se montira specijalnim steznim spojem. Oštrica se može učvrstiti sa jednim ili nekoliko vijaka.

Sistem stezanja sa dva vijka daje mirniji sustav rada. Svrklo sa izmjenjivim vrhom koristi se kod obrade dubokih provrta. Ne koriste za završnu obradu ukoliko je tražena točnost ispod 0,08 mm, a uzrok leži u tom da je pogreška u montaži oštrice.

Držać je najčešće načinjen od brzoreznog čelika, dok se za oštricu koristi brzorezni čelik, nehrđajući čelik sa posebnim prevlakama, volfram karbid. Na slici 18. je prikazano takvo svrdlo. [11]



Slika 18 Svrklo s izmjenjivim vrhom [11]

### 5.2.3.2. Svrđlo s izmjenjivim reznim pločicama

Svrđla s izmjenjivima pločicama od tvrdog metala koriste se za velike brzine bušenja i ekonomična bušenja kraćih provrta do dubine 5D promjera svrđla, a promjeri takvih provrta su od 10 do 150 mm. Kroz svrđlo dovodi se SHIP na obje rezne oštrice i zbog toga su moguće veće brzine rezanja i smanjenje vremena bušenja.

Svrđla sa izmjenjivim pločicama konstituirani su od čelične jezgre i izmjenjivih pločica koje se nalaze na vrhu svrđla. Takva svrđla nemaju potrebu izrade zabušivanjem, koje je potrebno kod bušenja spiralnim svrđlima. Kut vrha alata se kreće od 150° do 200°.

Prednosti svrđla s izmjenjivim pločicama su [3]:

- Brzine rezanja do 12 puta veća nego kod svrđla od HSS čelika
- Nema potrebe za oštrenjem alata
- Jednostavna zamjena reznih pločica
- Širok izbor reznih pločica ovisno o materijalu obratka
- Dobra točnost obrade provrta

Danas se većinom koriste pločice s Wiper tehnologijom koja nam daje mogućnost da se istim posmakom dobije mnogo bolja kvalitetu obrade, odnosno da sa 50% većim posmakom dobijemo istu kvalitetu obrade kao i kod običnih pločica što doprinosi samoj brzini izrade provrta.



**Slika 19** Svrđlo s izmjenjivim reznim oštricama [11]

### 5.2.3.3. Svrđlo s izmjenjivom glavom

Osnovna razlika između svrdla sa izmjenjivom glavom i vrhom je u tom što se sa svrdlom sa izmjenjivom glavom postiže za jednu vrijednost bolja točnost, odnosno površinska hrapavost. Svrđla sa izmjenjivom glavom najčešće se sastoje od čeličnog držača i izmjenjive glave. Glava ima kompleksnu geometriju vrha i lagano se mijenja. Točnost poravnavanja kod ponovnog postavljanja vrha se kreće oko 0,02 mm.

Sa ovim svrdlima može se raditi sa većom točnosti, posmakom i mirnijim radom u dubljim provrtima nego sa svrdlima s izmjenjivim vrhom. Zbog kompleksnije primjene cijena ovog svrdla je najveća o odnosu na ostale vrste spomenute u radu. Upravo iz toga razloga treba se izrazito dobro elaborirati namjena kako bi se utvrdilo ima li isplativosti ulaganjem u ovu tehnologiju. On pronalazi svoju primjenu na automatiziranim obradnim centrima koji su trenutno u proizvodnjama, poput 3D, 4D ili čak 5D CNC obradnih sustava. [11]

## 5.3. Duboko bušenje

Definicija dubokog bušenja se odnosi na provrte gdje je  $l/d$  veći od 5. U slučajevima dubokog bušenja postoji nekoliko problema poput dovođenja SHIP-a, odvođenje odvojene čestice, slijepi provrti, dimenzijske tolerancije.

Bušenje dubokih provrta vrši se različitim načina i sa različitim alatima, tolerancijama i u različitim uvjetima. Osnovni parametar je promjer rupe, zahtijevane dimenzijske točnosti i tolerancije površine, te veličina serije i ostali faktori. Tijekom bušenja, važno je da strugotina bude usitnjena i da se može transportirati bez ometanja i utjecaja na bušenu površinu.

Bušenje tehnologijom dubokog bušenja je poželjna metoda za dubinu bušenja dubine većih od promjera za 10 puta, ali zbog visokog kapaciteta i preciznosti uklanjanja metalnih strugotina, ona je također konkurentna za male rupe do dva puta promjera.

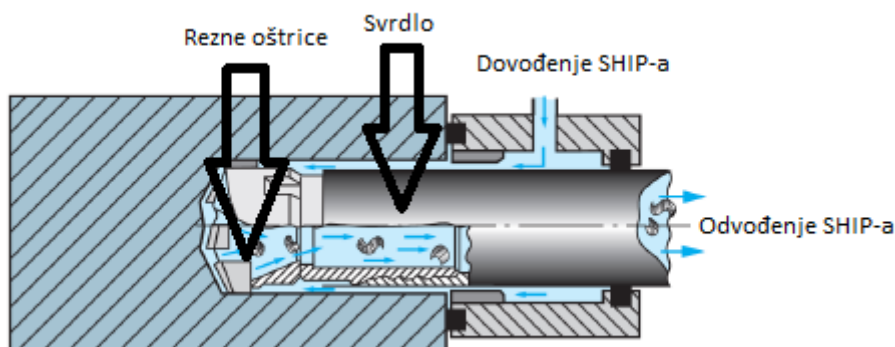
Upotrebom odgovarajućeg alata – svrdla za duboko bušenje mogu se eliminirati sekundarne operacije proširivanja, honanja ili brušenja postojećeg provrta. [19]

Postoji puno različitih izvedbi dubokog bušenja, ali najpoznatiji jesu slijedeći: [19]

- BTA postupak
- Bušenje topovskim svrdlom
- Ejektorsko bušenje

### 5.3.1. BTA postupak

BTA postupak sa alatom koji ima više oštrica i spada u red najbržih načina izrade provrta promjera do 100 mm. Postupak bušenja provrta BTA svrdlom razvijen je u namjeri da se spriječi struganje odvojenih čestica po unutrašnjoj površini provrta. Ono se obavlja na specijalnim namjenskim strojevima za duboko bušenje BTA svrdlom gdje su brzine rezanja 5-6 puta veće od klasičnog bušenja što ujedno znači i veću produktivnost postupka. BTA sustav ili sustav sa jednom cijevi (STS) je proces bušenja tipično korišten za velike promjere. Ovaj postupak dopušta dubinu bušenja u odnosu na promjer čak do 100 puta. Sustav se hladi sredstvom za hlađenje preko tlačne glave između cijevi svrdla i blazinice. Sredstvo za hlađenje teče preko glave svrdla omogućavajući efikasno podmazivanje svrdla i odvajanje odvojenih čestica. Mješavina odvojenih čestica i sredstava za hlađenje vraća se interno preko otvora za odvojene čestice i cijevi svrdla natrag u spremnik sredstva za hlađenje. BTA sustav je prikazan na slici 20. [14]



Slika 20 BTA postupak dubokog bušenja [14]

### 5.3.2. Bušenje topovskim svrdlom

Bušenje topovskim svrdlom, (engl., “*gun-drilling*”) proces bušenja dugačkih ili dubokih rupa, star preko 100 godina i korišten u izradi pištolja. Razvoj tehnologije sa specijaliziranim strojevima i konstrukcijom alata, dovela je do toga da je bušenje topovskim svrdlima pouzdana i izrazito produktivna metodom za bušenje kako kratkih tako i dubokih provrta. Princip bušenja topovskim svrdlom jest taj da se alat sastoji od V-utora ili cijevi u obliku slova V na svojoj dužini i alata rezne oštrice od karbida napravljenog na taj način da uspostavlja svoj vlastiti sustav samo podmazivanja tijekom bušenja provrta. Tekućina za hlađenje se pod visokim tlakom dovodi u zagrijanu zonu rezanja svrdla preko pogona stroja za topovsko bušenje na način da pomogne u snižavanju temperature te odvajanju odlomljenih čestica duž V-utora. Bušenje topovskim svrdlima omogućuje tolerancijski izuzetno točan provrt u dopuštenom odstupanju sa odličnom površinskom obradom. [15]



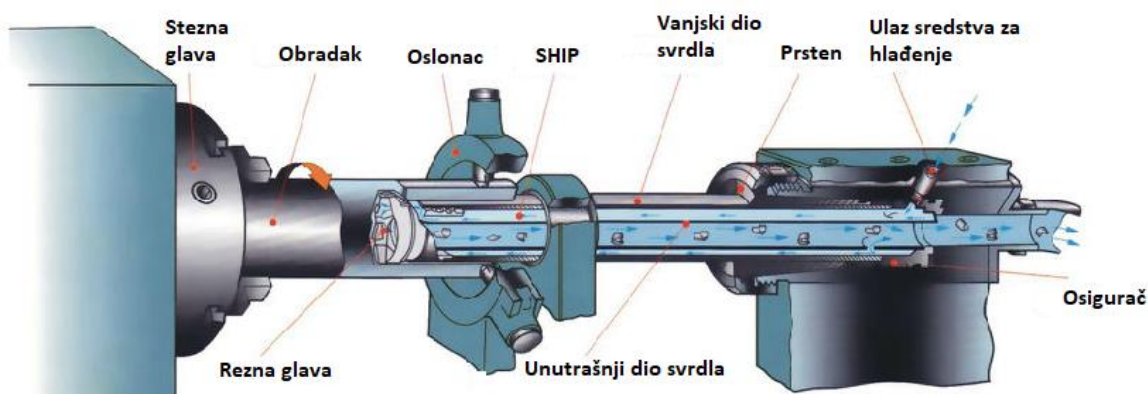
Slika 21 „TechniDrill“ sustav bušenja topovskim svrdlom [15]



### 5.3.3. Ejektorsko bušenje provrta

Ejektorsko bušenje je jedna od tri glavne metode za bušenje dubokih rupa (definiran omjerom dubine i promjera veće od pet), zajedno s bušenjem topovskim svrdlom i bušenjem BTA / STS. Uređaj za ejektorsko bušenje sastoji se od par koncentričnih cijevi koji formiraju bušaču cijev, rezače glave svrdla radi stvarnog bušenja metala, rotirajućeg konektora (koji se ponekad naziva i induktor rashladne tekućine) za dobavu rashladne tekućine iz vretena kroz bušaće cijevi i adapter na prednjoj strani vretena kroz koju izlazi rashladna tekućina i odvojene čestice.

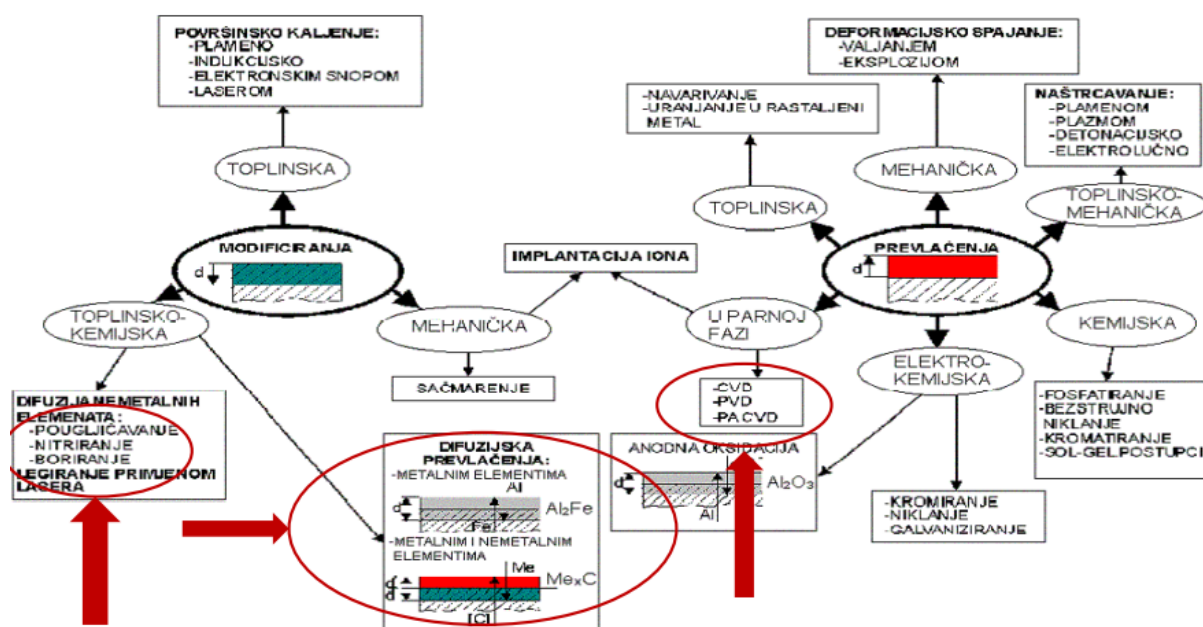
Ejektorsko bušenje može biti znatno brže od spiralnog bušenja (između 5 i 20 puta) i poznato je za bušenje ravnih rupa s odličnim tolerancijama. Jedno od njegovih ograničenja uključuje vrstu materijala izradaka: ejektorsko bušenje najbolje radi s materijalima koji proizvode jako puno odvojenih čestica prilikom bušenja, što je suprotno od BTA. To je zbog ograničenog prostora za uklanjanje odvojene čestice, što je također ono što ograničava bušenje ejektorski na minimalne promjere od oko 19 mm. Tvrtke poput Boteka nude ejektorske bušilice koje se kreću od 19 mm do 200 mm promjera. [16]



Slika 22 Ejektorsko bušenje [17]

## 6. PRIMJENA POSTUPAKA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA

Prema osnovnim fizikalnim i kemijskim zakonitostima procesa obavljena je podjela i klasifikacija postupaka obrade površina. Glavna podjela se odnosi na postupke modificiranja i na postupke prevlačenja površina. Prilikom postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od osnovnog materijala i slojevi prevlake su usmjereni prema unutrašnjosti metala. U postupcima prevlačenja površinski sloj se stvara na osnovnom materijalu i slojevi se slažu na tu površinu, slika 23. Razlike između slojeva su u osnovnom obrađenom materijalu u kombinacijama kemijskog sastava, kristalne rešetke, mikrostrukturnog sastava i drugih svojstava materijala koji daju različita finalna svojstva. Modificiranje i prevlačenje površina provodi se najčešće mehaničkim, toplinskim, kemijskim i/ili elektrokemijskim procesima kao i međusobnom kombinacijom ovih procesa. Nije moguće primijeniti nikakav oblik podjele postupaka za primjere kod graničnih slučajeva jer su kod njih prisutni elementi karakteristični za obje skupine. Trenutno se najviše primjenjuju i tzv. „duplex“ postupci koji kombinaciju dvije vrste postupaka [20].



Slika 23 Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja [21]

## 6.1. Postupci modificiranja površina

Modificiranje površinskih slojeva metalnih materijala provodi se kombinacijom postupaka koji se uglavnom razlikuju s obzirom na vanjsko djelovanje na obradak koje može biti mehaničko, toplinsko ili toplinsko-kemijsko.



Slika 24 Shematski prilaz modificiranja površine [21]

### 6.1.1. Mehaničko modificiranje

Mehaničkim djelovanjem tlačnih naprezanja kod površinskog sloja metalnog materijala dolazi do promjena u kristalnoj rešetci, deformacijom dislokacija što rezultira boljoj otpornosti površine. Ovaj se postupak provodi kontroliranim sačmarenjem površina konstrukcijskih dijelova, najčešće zupčanika, u cilju dodatnog povećanja nosivosti boka zuba i povišenja dinamičke izdržljivosti zupčanika [20].

### 6.1.2. Toplinsko modificiranje

Dovođenjem toplinske energije i rastom temperature površinskog sloja strojnih dijelova izrađenih od čelika i željeznih ljevova provodi se površinsko kaljenje. Kombinacijom visoke gustoće toplinske energije i kratkim trajanjima procesa, ugrijavanje utječe samo na površinski sloj uzorka. Osim plamenog i indukcijskog zagrijavanja, najnovije metode su kaljenje uporabom elektronskog snopa ili primjenom lasera [20].

### 6.1.3. Toplinsko-kemijsko modificiranje

Postupci u ovoj skupini kojima se, osim unošenja toplinske energije, dodavanjem drugih kemijskih elemenata mijenja kemijski sastav a time i mikrostruktura kao i svojstva površinskih slojeva. Primjenom difuzije nemetalni materijali se unose u površinski sloj metalnog materijala. Strojogradnja najčešće primjenjuje postupke pougljičavanja, nitriranja, vanadiranja te kombinirani postupci istovremene difuzije ugljika i dušika (karbonitriranje i nitrokarburiranje) odnosno varijante sa kisikom ili s sumporom [20].

## 6.2. Postupci prevlačenja površina

U postupcima prevlačenja površina na površinu materijala nanosi se određena prevlaka ili više njih u svrhu povećanja površinske tvrdoće i samim time otpornosti na trošenje materijala. Prilikom nanošenja prevlaka bitno je napomenuti kako jezgra ostaje ne taknuta, što je dobro u slučajevima kada se zahtjeva žilavost jezgre materijala.



Slika 25 Shematski prikaz prevlačenja površina [21]

### 6.2.1. Toplinska prevlačenja

Površinski sloj nastaje primjenom topline za rastaljivanje metalnog materijala koji potom kristalizira i slaže se u obliku slojeva na osnovni metalni materijal. Koriste se postupci navarivanja slojeva ili uranjanja u tekući metal. Navarivanjem se postiže cilj otpornosti na trošenje i u nekim slučajevima povećanje otpornosti prema nekim kemijskim elementima. Najčešće se radi o debljim slojevima širokog polja tolerancija dimenzija koji se i nakon istrošenja mogu naslojavanjem obnoviti [20].

### 6.2.2. Mehanička prevlačenja

Mehaničkim djelovanjem ostvaruje se deformacijsko spajanje različitih metalnih materijala koji imaju posve različita svojstva, a većinom se postiže otpornost prema kemijskom djelovanju. Primjenjuju se postupci toplog i eksplozijskog spajanja [20].

### 6.2.3. Toplinsko-mehaničko prevlačenje

Toplinskom energijom se rastali dodatni materijal, a rastaljene čestice mehaničkom silom se usmjeravaju prema površini obrađivanog predmeta te tamo skrućuju. Različitim postupcima naštrcavanja (plamenom, plazmom, detonacijski, elektrolučno) stvaraju se različiti metali, legure i mješavine s keramičkim materijalima sa svrhom povećanja otpornosti na trošenje ali s potrebom povećavanja prema kemijskom djelovanju. [20].

CVD (Chemical Vapour Deposition) postupci 800 ÷ 1000 °C		PVD (Physical Vapour Deposition) postupci 200 ÷ 500 °C	
MTCVD (Medium Temperature CVD) 700 ÷ 900 °C			
PA CVD (Plasma Assisted CVD) ≈ 200 °C			
Čelici (nakon kaljenja i popuštanja) - Tvrdi metal	Spojevi	Čelici (nakon kaljenja i popuštanja) - Tvrdi metal	
	Neoksidna keramika		- karbidi: TiC, B <sub>4</sub> C, SiC, ... - nitridi: TiN, TiAlN, CrN, ... - karbonitridi: TiCN, TiAlCN, ...
	Oksidna keramika		- oksidi: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , ...
	Metaloorganski spojevi		- Me:CH (W <sub>97</sub> C <sub>3</sub> ,...
	Dijamantu slični ugljik		- DLC (Diamond like Carbide)
Svojstva: visoka tvrdoća, visoka otpornost trošenju (abraziji, adheziji, tribokoroziji)			

Slika 26 Sistematizirana podjela prevlačenja površine [22]

### 6.3. Prevlačenja u parnoj fazi

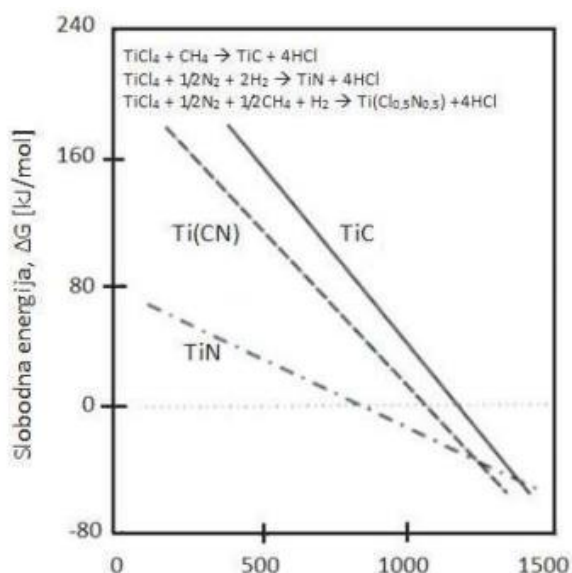
Razvojem tehnologije dolazi do posebno brzog razvoja i primjena postupaka prevlačenja materijala u parnoj fazi. Trenutačno najveću primjenu ima na području izrade konstrukcijskih elemenata i alata u cilju povećanja eksploatacije, otpornosti i trajnosti. Prevučeni slojevi ovom tehnologijom na konstrukcijskim elementima i određenim područjima imaju jako nizak koeficijent trenja i višestruko dužu trajnost u radu nego dijelovi od osnovnog materijala. Izrazito važnu ulogu ovdje ima adsorpcija prevlake na površinu kao i međusobnih slojeva prevlaka. Postupcima prevlačenja u parnoj fazi nanose se jednoslojni ili višeslojni stabilni i tvrdi spojevi koji spadaju u segmente neoksidne keramike (TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCN, SiC), oksidne keramike (TiO), metalo organskih spojeva: CH (WC) te dijamantu sličnog ugljika (DLC – engl. „*Diamond Like Carbon*“). Glavna podjela ovih postupaka je slijedeća:

1. Kemijsko prevlačenja u parnoj fazi (CVD)
2. Fizikalno prevlačenja u parnoj fazi (PVD)
3. Plazmom potpomognuti postupci kemijskog prevlačenja u parnoj fazi (PACVD) [23].

#### 6.3.1. Kemijsko prevlačenje iz parne faze (CVD)

Industrijska primjena tvrdih prevlaka, otpornih na trošenje je započela upravo sa CVD - (engl., *Chemical Vapor Deposition*) prije otprilike 30-ak godina. [26]

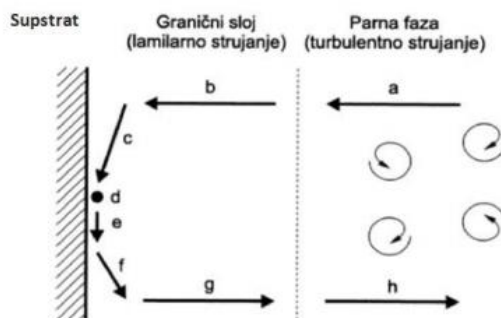
CVD postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi nastaje kemijskom reakcijom isparavanja (raspada) i sublimacije (taloženja) na površini prevučenog materijala, a uključuje interakciju između smjese plinova u aktiviranom okolišu (toplina, svjetlo, plazma) i površine zagrijanog osnovnog materijala. Princip postupka CVD temelji se na kemijskom raspadu utjecajnih elemenata nekih od korištenih konstituenata i kemijskim reakcijama jednog ili više međusobnih spojeva drugim parnim i plinovitim fazama za dobivanje gustoga, krutoga i stabilnog sloja u obliku prevlake na osnovnom supstratu. Zbog kontroliranih uvjeta rada ovim postupkom postiže se atomarna depozicija materijala vrlo visoke čistoće, čija se struktura može kontrolirati na atomarnoj ili nanometarskoj razini. [21].



Slika 27 Ovisnost slobodne energije i temperature [21]

Međusobni utjecaj promjene slobodne energije na temperature CVD postupka i obrnuto prikazan je na slici 27. Osnovni parametri CVD procesa su temperatura rada (potrebno ju je održavati konstantnom kako bi se na osnovnom materijalu ne smetalo odvijala kontrolirana kemijska reakcija, u suprotnom to će se dogoditi u plinovitoj fazi), tlak rada (područje visokog vakuuma), koncentracije (udio) plinskih reaktanata te ukupni tok plina. TiN prevlaka počinje se stvarati pri temperaturama od oko 650°C, a TiC prevlake tek iznad 900 °C. Smanjenje toplinskog šoka i bolja adsorpcija se postiže zagrijavanjem supstrata (osnovni materijal) na temperaturu obrade između 900 i 1000°C kako bi došlo do odvijanja reakcije.

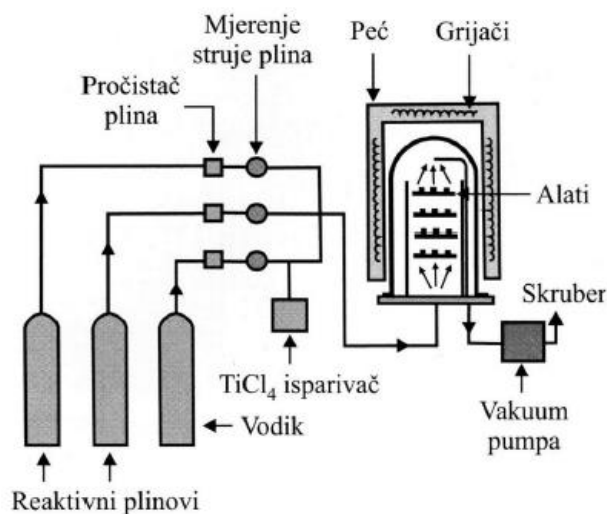
Bitna stavka u procesu je jednolična temperatura po cijeloj površini obratka. Pojedinačni koraci CVD procesa prikazani su na slici 28. [21]



Slika 28 Faze CVD postupka [23]

Slikom 28 prikazan je tijek odvijanja CVD postupka:

- a) i h) tijek putanje plinovitih reaktanata, odnosno nusprodukata u plinskoj fazi kroz sustav,
- b) i g) transport i strujanje reaktanata i nusprodukata u laminarnom graničnom sloju uslijed difuzije, neposredno prije dolaska do površine materijala
- c) adsorpcija plinovitih reaktanata na površini substrata i početak slaganja slojeva,
- d) postupak reagiranja apsorbiranih reaktanata uz stvaranje otpornog tvrdog spoja,
- e) površinska difuzija čestica na zagrijanom supstratu koji stvaraju tvrdi spoj i ugradnja u kristale površinskog sloja,
- f) desorpcija plinskih nusprodukata na strani površine osnovnog materijala i njihovo odvođenje.



**Slika 29** Shematski prikaz postrojenja za prevlačenje CVD postupkom [21]

Uređaj za CVD postupak shematski je prikazan na slici 29. Postupak započinje pripremom dijelova koje treba prevući, a sastoji se od temeljitog čišćenja pri čemu se otklanjaju slobodne čestice i ostaci maziva. Prvo je potrebno pravilno posložiti uzorke u komoru da bi se postigla ravnomjerna i kvalitetna prevlaka. U idućem koraku u komori se postiže visoki vakuum, povećava se temperatura ispitivanja supstrata u reducirajućoj atmosferi na temperaturu između 900°C i 1000°C, da bi se depasivirala površina uzoraka. [20] Najveća prednost CVD procesa je ta da se transport čestica i reaktanata koji se koriste odvijaju u plinovitom stanju čime se postiže odlična fluktuantnost prevlake uzoraka i njihovo ravnomjerno nanošenje. Osim toga neke od ostalih prednosti ovog postupka prevlačenja su sposobnost proizvodnje visoko čistih prevlaka i postizanje izrazito visoke gustoće. Također moguća je primjena različitih elemenata prevlaka i njihovih kombinacija. Samim time se postiže adekvatna ekonomična proizvodnja budući da se istovremeno može prevlačiti više dijelova sa različitim elementima. Brzina prevlačenja se može lako podešavati, troškovi procesa za konvencionalnu CVD tehniku su umjereni, jedino je nešto viši početni potreban investicijski kapital. [24]

Osnovna funkcija CVD reaktora je zagrijavanje uzroka do temperature obrade koja iznosi 900-1000°C. U različitim izvedbama postoje toplo-zidni i hladno-zidni reaktori.

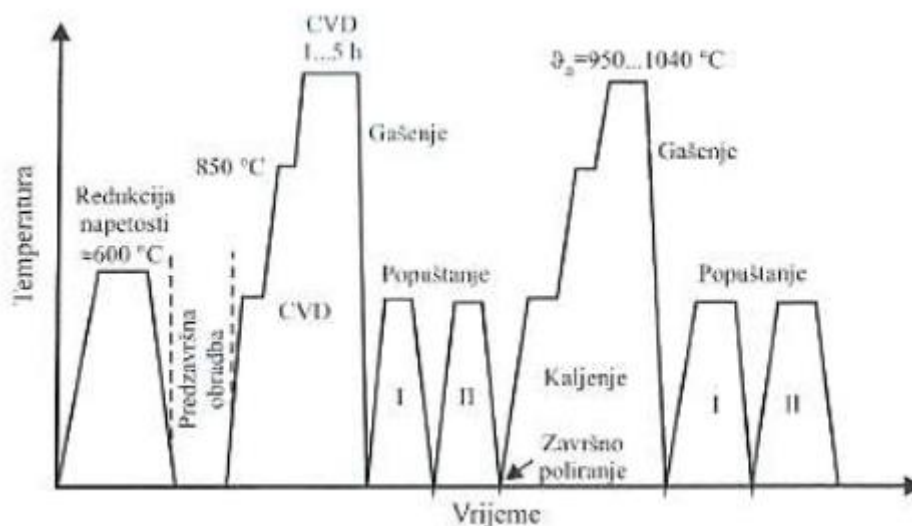
Toplo-zidni reaktor koristi peć za zagrijavanje (elektrootporna ili indukcijska peć), u koju se nakon toga postavljaju supstrati koji se indirektno zagrijavaju, dok kod hladno-zidnog reaktora se zagrijava samo uzorak i držač na koji je on pričvršćen (indukcijski).



Plinovi procesa najčešće su: inertni ( $N_2$ , Ar), reduktivni ( $H_2$ ) i reaktivni plinovi ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ). Postoje razne izvedbe CVD reaktora, ali svi imaju nekoliko zajedničkih komponenti [20]: zagrijani supstrat na radnu temperaturu, reakcijska posuda, izvor reaktivnih plinova, izlazni sistem produkata reakcije.

Nakon odvijanja reakcija pri visokim temperaturama potrebno je provesti naknadnu toplinsku obradu. Ova metoda se provodi kod prevlačenja toplinski osjetljivih materijala, poput alatnih i reznih čelika koji osim visoke tvrdoće moraju posjedovati svojstva prokaljivosti i naknadnog kaljenja.

Na slici 30 prikazana je jedna od opcija nanošenja CVD prevlaka na brzorezne čelike s naknadnim kaljenjem i popuštanjem [5].



**Slika 30 Shematski prikaz CVD postupka i dodatne toplinske obrade [21]**

U tablici 3. prikazani su postupci detaljne podjele CVD postupka u odnosu na temperaturu, tlak, primjenu i izvor topline. [21]

Tablica 3 Vrste CVD postupaka [21]

Postupak	Izvor topline	Temperatura (°C)	Tlak (KPa)	Primjena
<b>Toplinski CVD</b>	Elektrootporno, indukcijsko, infracrveno	800-2000	Varijabilan	Metalni filmovi, mikročipovi, optika
<b>PACVD</b>	Plazma	300-700	0,01-0,13	Toplinski osjetljivi supstrati
<b>LCVD (laser)</b>	Laser	/	0,13-101,3	Prevlake od Al, Ni, Pt, Si, W
<b>Foto CVD (PCVD)</b>	Lučne lampe, laser	/	1,01-101,3	Poluvodički filmovi
<b>Metalo organski CVD (MOCVD)</b>	/	300-800	3,9-10,6	Elektronički dijelovi
<b>Epitaksijska depozicija (CBE)</b>	/	450-550	Visoki vakuum	Kombinacija tehnika fizikalne i kemijske depozicije
<b>Atomska depozicija (ALE)</b>	/	/	Nizak ili visok	Ultra tanki filmovi za poluvodiče
<b>Kemijska parna infiltracija(CVI)</b>	/	Niska	Nizak	Visoko čvrsti Si-karbidi, C-C kompoziti
<b>Fluidizirani CVD</b>	/	1000	Nizak	Nanošenje Si, Ti, TiN, Zr, ZrN na čeliku

Prednosti CVD postupka jesu slijedeći: [21]

- gustoća prevlake je jako visoka (95 - 99%),
- dobivaju se homogeni filmovi visoke čistoće (99,99-99,999 %), dobre kvalitete i adhezije površine,
- procesom se kontrolira veličina zrna, struktura materijala, morfologija površine i orijentacija,

- jeftino pred čišćenje substrata,
- mogućnost stvaranja meta stabilnih faza,
- mogućnost depozicije vatrootpornih materijala kod temperatura ispod njihovih točki taljenja ili sinteriranja,
- brzina depozicije lagano se podešava,
- potrebna oprema je relativno jednostavna i nema potrebe za visokim vakuumom i električki provodljivim supstratom,
- prilagodljivost procesa omogućava promjene sastava deponiranog sloja,
- dobra kontrola stehiometrije i debljine filma.

Nedostatci u CVD procesu jesu slijedeći: [21]

- rizik u procesu zbog korištenja otrovnih, korozivski agresivnih, zapaljivih ili eksplozivnih plinova prekursora,
- visoka temperatura radnog postupka,
- opasnost od deformacija materijala,
- poteškoće u nanošenju višekomponentnih materijala s kontroliranom stehiometrijom površine,
- nužna je velika energija nanošenja, posebno kod depozicije pri visokoj temperaturi,
- visoka cijena početnog uloga u sustav.

#### 6.4. PVD postupak

PVD (engl., *PVD – Physical Vapor Deposition*) je tzv. fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze. Materijal koji se deponira na površinu uzorka je dobiven na fizikalni način. On se iz čvrste faze prenosi (naparivanjem ili naprašivanjem) u parnu fazu (engl., *Physical*), gdje nakon tog putuje od izvora najčešće u vakuumskoj atmosferi ili u stanju plazme na osnovni materijal. Deponiranjem na osnovni materijal, sloj se skruti u tanki film. Prednost postupka je upotreba gotovo svih elemenata u različitim debljinama. Debljina PVD prevlaka kreće se oko 2-5  $\mu\text{m}$  za jednoslojne, a može biti 15  $\mu\text{m}$  za višeslojne prevlake. Postoje slučajevi kada je debljina prevlake dostigla i do 100  $\mu\text{m}$  u specifičnoj primjeni, (npr. CrN prevlaka). Brzina depozicije, odnosno slaganja slojeva na osnovni materijal kod nanošenja PVD prevlaka je 3 - 20  $\mu\text{m/h}$ . Alati (od brzoreznih čelika) s PVD prevlakama (TiN) za tribološke primjene počeli

su se koristiti već od 1980-ih godina. Razvojem PVD prevlaka povećava se trajanje oštice materijala, toplinska otpornost materijala, kemijska postojanost u korozivnim uvjetima primjene, otpornost na trošenje, smanjuje se koeficijent trenja, povećava se i poboljšava sveukupni izgled proizvoda (TiN – zlatna boja površine). [21]



**Slika 31** Dijelovi prevučeni PVD postupkom [25]

U PVD postupku, plinovito stanje materijala prevlake postiže se toplinskim postupcima ili postupcima koji nisu toplinski. Za toplinske postupke isparivanja materijal filma prevlake se ugrijava do određene temperature na kojoj se postiže tlak metalnih para oko  $10^{-2}$  mbara.

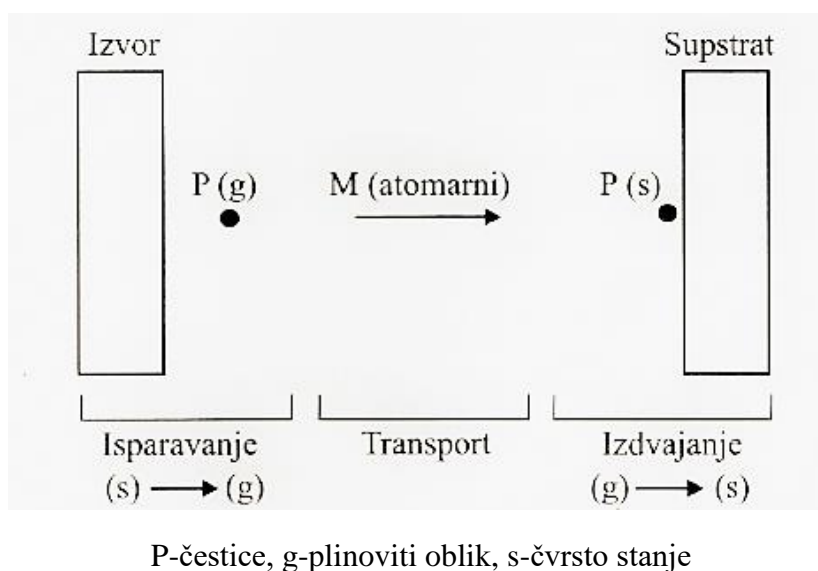
Vrste postupaka isparivanja materijala prevlake su [9]:

1. isparavanje elektrootpornim zagrijavanjem
2. isparavanje snopom elektrona
3. indukcijsko isparivanje
4. grijanje i isparavanje impulsnim laserskim snopom
5. isparavanje katodnim lukom

Isplativost ove metode u industriji alata je takva da su trenutno povoljniji materijali sa nanesenom prevlakom u odnosu na one bez prevlake kada uzmemo u obzir trošak zastoja proizvodnje zbog izmjene alata. Znatna poboljšanja svojstva prevlake se postižu prevlakama

nanosenim na nehrđajući čelik, aluminij, magnezij i titanove legure. Zbog tih razloga oni sve više zamjenjuju klasične materijale (alatni i konstrukcijski čelik). Glavna pretpostavka za rast i nanošenje tankih slojeva ovim postupkom je dovoljno dobra prionjivost (adhezivnost) između sloja prevlake i osnovnog materijala te kompaktna morfologija slojeva. Materijale slojeva karakterizira niska specifična masa (osim nehrđajućih čelika) i velika čvrstoća, iako su relativno meki i imaju nižu otpornost prema abrazijskom trošenju. Slojevi koji se najčešće koriste u primjeni PVD postupka su za nanošenje prevlaka od čistih metala kao što su: Al, Ag, Au, Ni, Cr, Ti, Mo i W, a u nekim slučajevima razne slitine poput: nehrđajući čelik, Ni-Cr slitine, Pb-Sn slitine, te određenih spojeva:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC i  $\text{TiBr}_2$ . Prijenos prevlake u plinovitom stanju od izvora do substrata može biti izveden kroz različite radne medije: vakuum, plin ili plazmu. [21]

PVD postupak se odvija na temperaturama ispod faznih transformacija ( $150\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ ), upravo to je i omogućilo brzi razvoj ovog postupka. Prednost i dobra značajka svih PVD postupaka je da nema neke najniže temperature odvijanja procesa, nego je optimalna temperatura osnovnog materijala i maksimalna temperatura kod koje ne dolazi do promjene svojstva čvrstoće osnovnog materijala. Kod svih vrsta PVD postupaka slojevi se nanose u tri faze (slika 32) [21].



**Slika 32 Shematski prikaz taloženja PVD [21]**

Zona spojeva je zaslužna za dobru adheziju, koja je temelj ovog postupka i ukoliko je ta zona predebela, razvoj poroznosti i nusprodukata vodi do loše adhezije. Zonu spojeva kod ovog postupka nastaje difuzijom s kemijskim reakcijama. Zaostala naprezanja u zoni spojeva uzrokovana su raznim volumnim promjenama prilikom nastajanja novih faza. Spojevi su vrlo izrazito krhki i imaju velika zaostala naprezanja. Rastom tih naprezanja može doći do stvaranja mikropukotine i pada mehaničkih svojstva svih slojeva daljnjom propagacijom prevlake. Zona spojeva većinom je prisutna u reaktivnim sustavima ili intermetalnim sustavima. Smanjenje i eliminacije pojave moguće je postići ovim načinima [24]:

- čišćenjem i pripremom površine substrata (osnovni materijal);
- promjenom temperature substrata i vremena taloženja na uzorak;
- povećanjem energije na površinskoj zoni tijekom taloženja, grijanjem ili bombardiranjem ionima

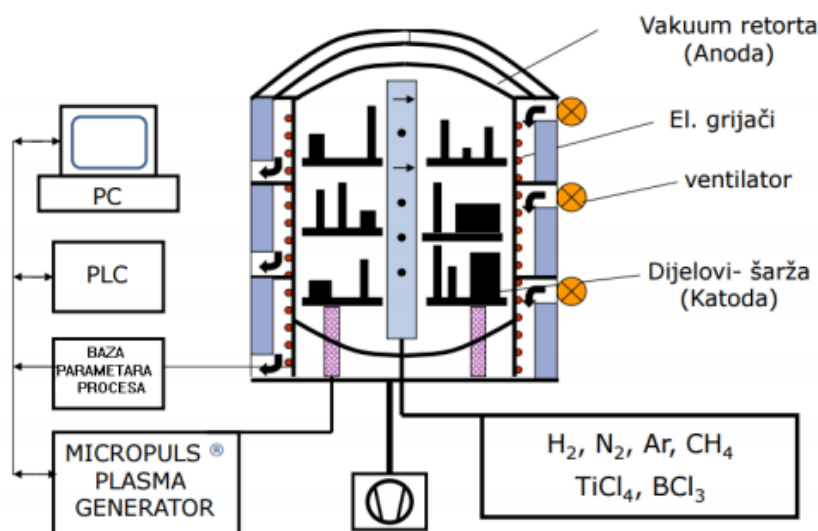
## 6.5. PACVD

PACVD (engl., *Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*) nudi mogućnost nanošenja prevlake na različitim temperaturama bez potrebe za pomicanjem uzoraka. [27] Zbog toga razloga puno je lakše raditi sa takvim postrojenjem u odnosu na PVD, gdje uzorci trebaju biti pomicali za postizanje ravnomjernog sloja prevlake. Tlak sustava kod PACVD se obično kreće između 50 i 1000 Pa i to je otprilike oko 100 puta veći tlak u odnosu na PVD, čime se postiže manja osjetljivost sustava. Čelik je često potrebno naknadno obraditi u svrhu snižavanja zaostalih naprezanja, a upravo zbog toga razloga ta tehnologija postaje gotovo neupotrebljiva kod dijelova kompleksnijeg oblika. [28]

Plazmom potpomognuti PACVD postupak prevlačenja metodu aktivacije za odvijanje taloženja na nižim temperaturama i umjerenim brzinama postiže uz pomoć energije elektrona. Plazma se proizvodi dovođenjem električne energije dovoljno visokog naponu u plin pri tlaku ispod 1,3 kPa rezultira dijeljenjem plina, a ona se sastoji od elektrona, iona i elektronski pobuđenih vrsta. Dolazi do razgradnje i ionizacije plinskih reaktanata prilikom sudaranja s elektronima pri čemu nastaju kemijski aktivni ioni i radikali koji se podvrgavaju heterogenoj kemijskoj reakciji (kemijska reakcija između dvaju različito agregatnih stanja elemenata) ili neposredno uz zagrijanu površinu supstrata gdje se taloži tanki sloj prevlake. Ova tehnika kombinira prednosti CVD i PVD procesa. Kemijska reakcija taloženja odvija se na temperaturama oko 500°C. Relativno niska temperatura prevlačenja ima više prednosti pri čemu štiti uzorak i omogućuje stvaranje kvalitetnih prevlaka s visokom prionjivošću [20].

### 6.5.1. Uređaj za postupak PACVD

PACVD postrojenje se sastoji od generatora plazme, vakuumske komore s grijačima, vakuumske pumpe, sustava za dovod plinova ( $N_2$ , Ar,  $H_2$ ,  $CH_4$ ), PLC regulacijskog sustava i sustava za dobavu prekursora ( $TiCl_4$ ). Energija elektrona se koristi kao metoda aktivacije za slaganje slojeva na niskim temperatura PACVD postupka. Pri visokom naponu i tlaku uz električnu energiju dolazi do dijeljenja plina nastajanje plazme koja se sastoji od elektrona i iona. Tanki sloj prevlake se taloži uslijed reakcije između površine ili neposredno njene blizine i iona. Temperatura reakcije može se odvijati između 450 do 650 °C ovisno o materijalu prevlake i supstrata. Ukupan PACVD sustav vođen je PLC upravljačkom jedinicom. [29]



Slika 33 Shematski prikaz rada PACVD [23]

Tablica 4 Parametri PACVD procesa [20]

<b>Temperatura</b>	<b>300-600°C</b>
<b>Tlak</b>	10 – 1000 Pa
<b>Napajanje generatora plazme</b>	Istosmjerna ili izmjenična struja
<b>Debljina sloja prevlake</b>	1-10 $\mu m$
<b>Vrste slojeva</b>	TiN, TiC, TiAlN, DLC, TiBr
<b>Reakcijski plinovi</b>	$N_2$ , $H_2$ , Ar, $CO_2$ , $CH_4$ , $TiCl_4$

# **EKSPERIMENTALNI DIO**



## 7. PRIPREMA POKUSA TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA

### 7.1. Plan pokusa

U eksperimentalnom dijelu ovog rada bit će uspoređena ne prevučena i prevučena svrdla u jednakim eksploatacijskim uvjetima rada. Početan materijal svrdla je jednak jer su to svrdla istog proizvođača iz istog seta pa tako i iste šarže sirovca od kojeg su napravljena.

U prvom dijelu određena svrdla će biti prevučena PACVD uređajem u laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Radi se o različitoj „sendvič prevlaci“, odnosno sustavu prevlaka različitih materijala i kombinacija u svrhu postizanja određenih mehaničkih svojstava. Tehnologija prevlačenja materijala, kao i sustav prevlaka je jedna od najmodernijih tehnologija koja su trenutačno primjenjuje u svijetu. Sustav instaliran na Fakultetu strojarstva i brodogradnje je jedini takve vrste u ovom dijelu Europe.

Drugi dio eksperimentalne analize trošenja uključuje implementaciju rješenja izvedbe sustava za ispitivanje trošenja ne prevučenih i prevučenih svrdala u što je moguće jednakim uvjetima rada, prilikom čega će se voditi računa od velikom broju parametara. Ova metoda ispitivanja iziskuje modeliranje posebnog sustava vođenja i kontrole ispitivanja trošenja svrdala. Materijal obratka u koji će se bušiti je ne legirani nisko ugljični konstrukcijski čelik zajamčenih svojstava.

Kontrola ovog dijela eksperimentalne analize vršit će se na nekoliko načina koji uključuju određivanje točnog kemijskog sastava ne prevučenog, prevučenog svrdla, kao i materijala u koji će se bušiti svrdlima. Provjerit će se mehanička svojstva svih dijelova sustava ispitivanja. Materijali prevlake svrdala nanosene PACVD tehnologijom su: TiN, TiN/TiCN i TiN/TiBN, što znači da su u ukupnom sustavu 4 vrste svrdla uključujući i ne prevučena. Po završetku ispitivanja i detaljnoj analizi bit će predložena najoptimalnija prevlaka za ovu vrstu bušenja. Bušenje će biti izvedeno u „suho“. Takvo bušenje znači da se radi o bušenju bez ulja i SHIP-a. Bušit će se cijev kvadratnog poprečnog presjeka zajamčeno jednake debljine, šupljeg profila. Provodit će se bušenje određeni broj ponavljanja dok se ne utvrdi mjerodavna povezanost vrijednosti trošenja svakog svrdla za određenu vrstu prevlake. Svrdla korištena u ovom ispitivanju su svrdla promjera 4 i 6 mm.

U prvom dijelu svrdla su podvrgnuta postupku prevlačenja osnovnog materijala određenim prevlakama. Prevlačenje je obavljeno sa Rübig PACVD uređajem za prevlačenje materijala. Uzorci su podijeljeni prema vrsti prevlake:

- HSS: (engl., „*High speed steel*“) svrdla od brzoreznog čelika, bez prevlake
- TiCN: svrdla s sendvič prevlakom: nitrirano + TiN + (TiCN/TiN/TiCN)
- TiBN svrdla s sendvič prevlakom: nitrirano + TiN + (TiBN/TiN/TiBN)
- TiN: svrdla s prevlakom: TiN

Parametri prevlačenja prevlakama PACVD TiN/TiCN i PACVD TiN/TiBN prikazani su u tablici 5. Na slici 34 prikazan je PACVD uređaj za prevlačenje.

**Tablica 5. Parametri prevlačenja PACVD TiN/TiCN**

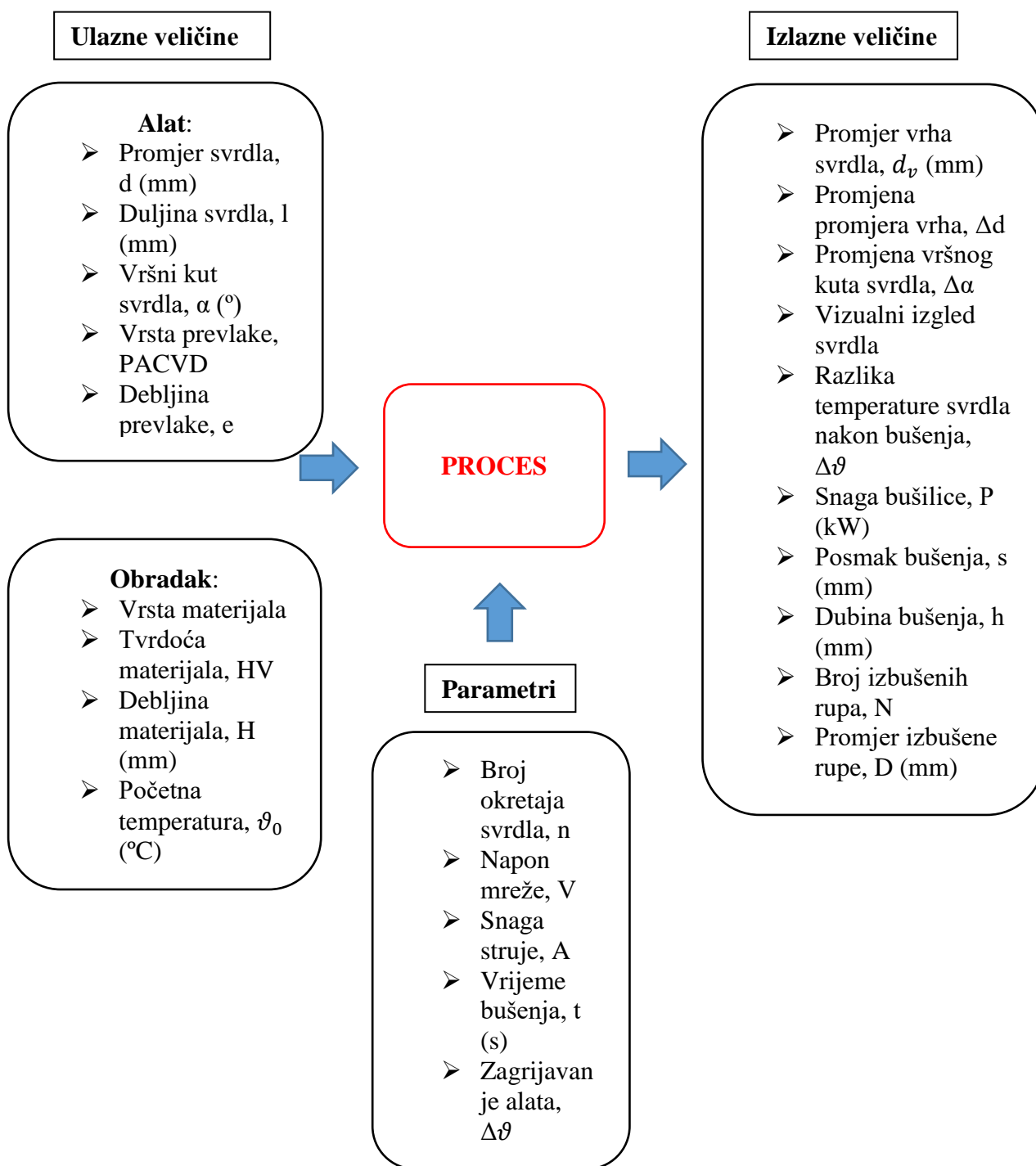
Naziv radnog parametra	PACVD TiN/TiCN	PACVD TiN/TiBN
Napon generatora plazme, V	490	560
Snaga plazme, W	1400	1650
Tlak u radnoj komori, mbar	2,0	2,0
Temperatura prevlačenja, °C	500	500
Vrijeme otprašivanja, h	2,0	5,0
Vrijeme taloženja TiN, h	1,5	2,0
Vrijeme taloženja TiCN, h	6,0	-
Vrijeme taloženja TiBN, h	-	10,0
Protok Ar, l/h	10,0	7,0
Protok H <sub>2</sub> , l/h	140	140
Protok N <sub>2</sub> , l/h	13,0	3,0
Protok CH <sub>4</sub> , l/h	4,5	-
Protok TiCl <sub>4</sub> , l/h	3,0	3,0
Protok BCl <sub>3</sub> , l/h	-	9,0



**Slika 34 PACVD uređaj RUBIG GmbH Type PC 70/90**

## 7.2. Modeliranje sustava svrdlo-obradak

Utjecajne ulazne veličine na tribološki sustav „alat-obradak“ prikazane su na slici 35. Utjecajne veličine obuhvaćaju sustav alat i obradak, dok izlazne veličine ispitivanog tribosustava obuhvaćaju izmjerene podatke nakon završenog ispitivanja.



Slika 35 Model sustav „svrdlo-obradak“

### 7.3. Simulacija eksperimentalnih uvjeta

Kako bi se postigli što bliži uvjeti ispitivanja trošenja onim uvjetima u serijskoj (masovnoj) proizvodnji, a sukladno opremi i budžetu s kojim Fakultet raspolaže bilo je potrebno zamisliti i pravilno postaviti opremu za ispitivanje.

Za potrebe ovih ispitivanja, glavni uređaj koji je korišten je stupna bušilica Bosch PBD-40, nazivne snage 710 W. Uređaj ima mogućnost održavanja konstantne brzine okretaja, mjerenje posmaka bušenja i lasersko očitavanje položaja bušenja. Stupna bušilica je prikazana na slici 36.



**Slika 36** Stupna bušilica PBD-40 [30]

U ovom slučaju se radi o uspoređivanju trošenja više različitih prevlaka, potrebno je bilo postići adekvatne i jednake uvjete trošenja. Snaga bušilice od 710 W zadovoljava potrebe ovih ispitivanja, kao i broj okretaja koja iznosi do 2500 okr/min. S obzirom na to da smo raspolagali s određenim brojem svrdala određenog promjera, sva su bušenja izvedena u jednakim, proizvoljno određenim uvjetima rada. Velik broj faktora je mjeren i održavan u ovom procesu ispitivanja, odnosno oni uključuju modifikacije koje su izvedene u kombinaciji sa stupnom bušilicom gore navedenom.

U provedenim ispitivanjima veličine koje se prate i mjere jesu slijedeće:

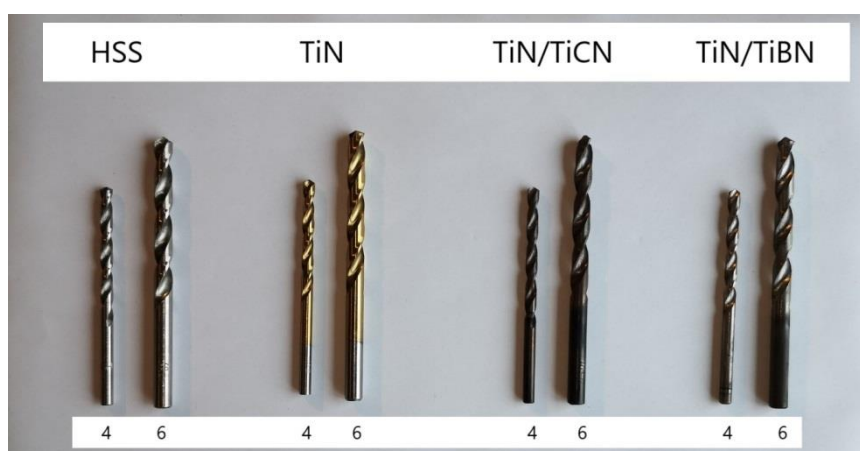
- Napon mreže, [V]
- Temperatura okoline, [°C]
- Snaga struje u procesu bušenja, [A]
- Trajanje bušenja, [s]
- Temperatura svrdla u procesu bušenja, [°C]
- Pritisna sila svrdla na obradak, [N]
- Posmak bušenja, [mm]
- Dubina bušenja, [mm]
- Broj provrta
- Promjer izbušene rupe, [mm]
- Broj okretaja svrdla, [min<sup>-1</sup>]

Točne vrijednosti svih parametara i njihove veličine za svaki uzorak posebno su prikazane u prilogu na kraju ovog rada. S obzirom na to da ispitivanja ovakvog tipa nisu bila učestalog karaktera do sada na Fakultetu, nismo ni znali koje rezultate očekivati. Kako će se parametri mijenjati? Hoće li se parametri mijenjati uopće? Koja je veza između parametara, ako ona uopće postoji? Izrazito velik rizik kod ispitivanja ove vrste je taj što smo raspolagali s ograničenim brojem uzoraka, a svaki uzorak se može samo jednom ispitati, bez mogućnosti ispravljanja pogreške. Zbog svih rizika postavljenih pred nas, izrazito je bilo potrebno odvojiti velik dio vremena, resursa i kompletne opreme na raspolaganju za pravilno planiranje pokusa kako bi ispitivanje proteklo u očekivanom tijeku i dalo čim točnije i relevantnije informacije. Tehnologija koja se implementira u prevlačenju ovih uzoraka je relativno nova, samim time izrazito skupa, što znači da je prostora za pogrešku jako malo.

U daljnjim poglavljima možemo vidjeti kako je pokus protekao, rezultate ispitivanja i zaključak u odnosu na provedeni pokus.

## 7.4. Provedba ispitivanja

U prvoj fazi ispitivanja određen je kemijski sastav i tvrdoća osnovnog materijala spiralnog svrdla te debljina prevlaka. Uzorci prevučeni PACVD tehnologijom korišteni za eksperimentalni dio ovog rada prikazani su na slici 37. Prva analiza je bila mjerenje dimenzija svrdala. Mjerio se promjer u tri presjeka kao i ukupna duljina svrdala. Postupak mjerenja obavljen je u laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prije svakog mjerenja uzoraka oni su ostavljeni u laboratoriju nekoliko sati gdje su se ohladili na temperaturu od 20°C.



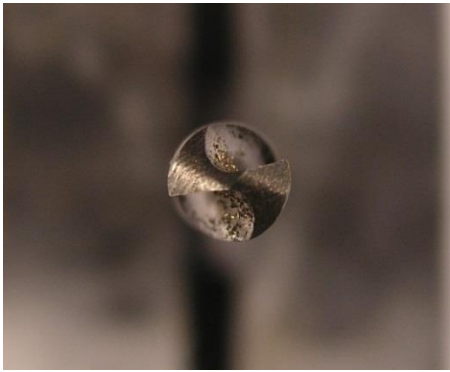
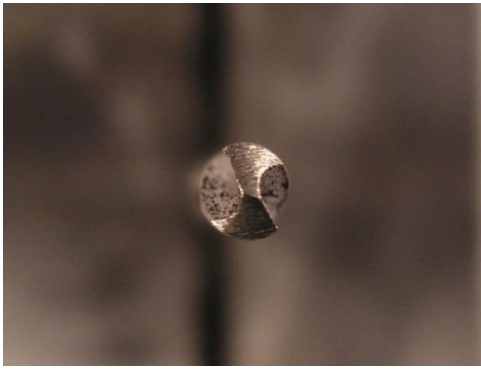
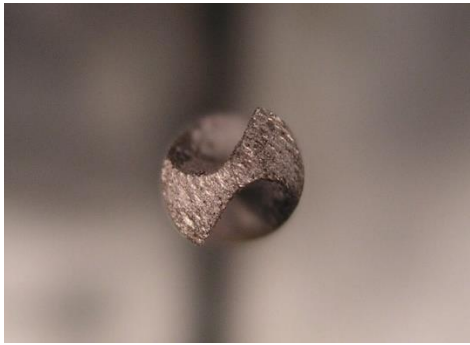
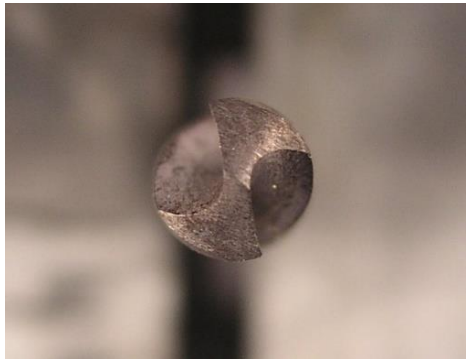
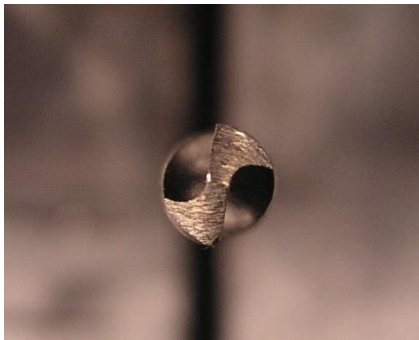
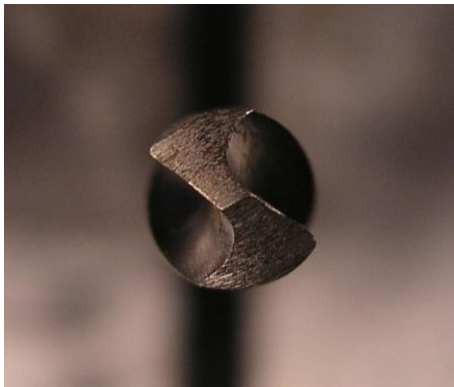
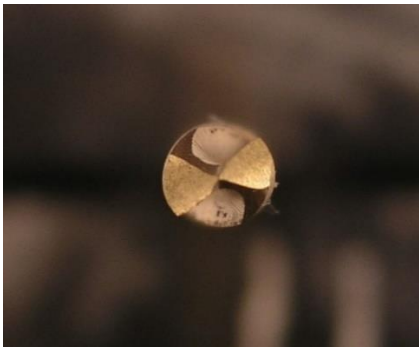
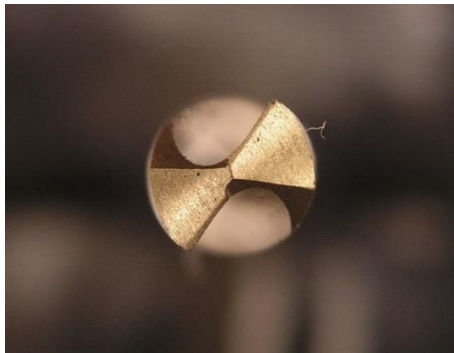
Slika 37 Ispitivana svrdla sa i bez prevlaka

Dimenzije provrta svrdala mjerena su u kontroliranim uvjetima sa umjerenim mikrometrom mjerne skale od  $1 \cdot 10^{-4}$  mm. Mikrometar je prikazan na slici 38. Sljedeći korak u ispitivanju je vizualna analiza glavnih oštrica svrdala (tablica 6).



Slika 38 Umjereni mikrometar za mjerenje promjera vrha svrdla

**Tablica 6 Izgled vrha ispitivanih spiralnih svrdla prije početka trošenja**

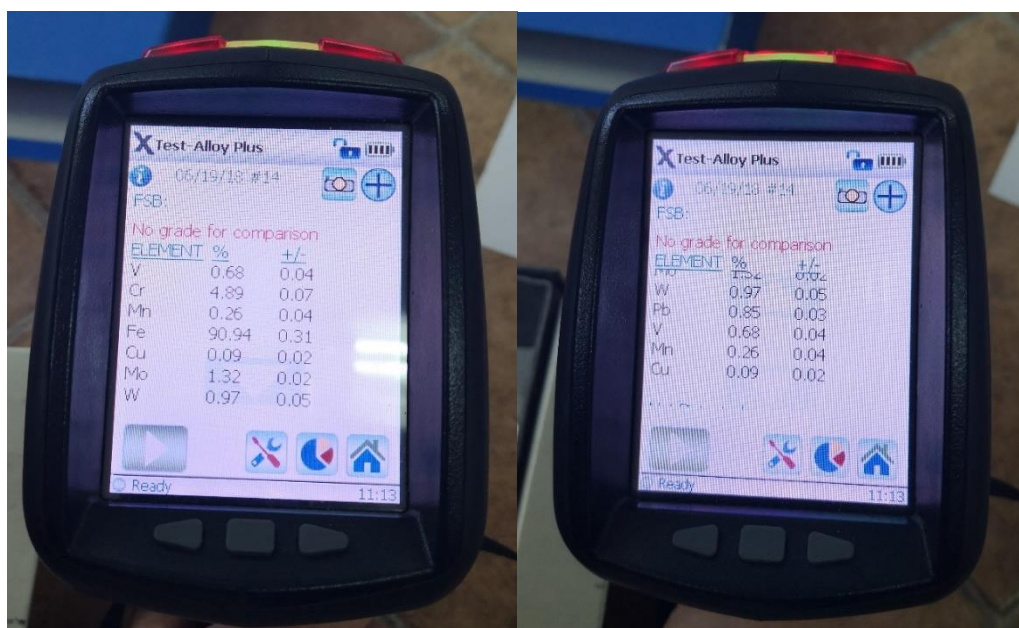
Materijal	Nazivni promjer svrdla, mm	
	4	6
HSS (neprevučeno)		
TiCN		
TiBN		
TiN		



## 8. REZULTATI

### 8.1. Analiza kemijskog sastava svrdla

Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala svrdala obavljena je u laboratoriju za površinsku zaštitu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korišten je uređaj za XRD analizu Olympus Innov-X. Rezultati kemijskog sastava prikazani su na slici 39 i tablici 7.



Slika 39 XRD analiza osnovnog materijala svrdla

Tablica 7 Udio elemenata u osnovnom materijalu svrdla

ELEMENT	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Mo	W	Pb
<b>Postotak</b>	0,68	4,89	0,26	90,94	0,09	1,32	0,97	0,85
<b>[%]</b>								
<b>Pogreška</b>	0,04	0,07	0,04	0,31	0,02	0,02	0,05	0,03

### 8.2. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala

Provedena je analiza tvrdoće osnovnog materijala svrdla i izvršena korekcija sukladno zaobljenju površine svrdla. Ispitivanje je obavljeno u laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Rezultati tvrdoće prikazani su u tablici 8.



Tablica 8 Rezultati izmjerene tvrdoće

Tvrdoća, HRC					
Redni broj mjerenja	1.	2.	3.	4.	5.
Rezultati	58	55	53	59	58
Rezultati sa korekcijom (+2,5)	60,5	57,5	55,5	61,5	60,5
Srednja vrijednost	59 ± 2				

Tvrdomjer korišten za mjerenje tvrdoće je marke Insize pri čemu je korišten dijamantni indenter vršnog kuta prizme od 136° i sila utiskivanja od 1471 N. Tvrdomjer je prikazan na slici 40.



Slika 40 Tvrdomjer Insize ISH-MR150-U

### 8.3. Određivanje debljine prevlake

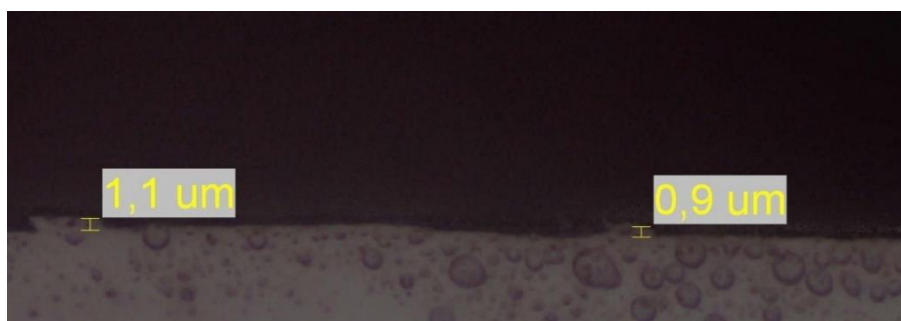
Nakon završenog ispitivanja trošenja bilo je potrebno obaviti metalografsku analizu kojom ćemo možemo odrediti debljinu svih prevlaka. Za pretpostaviti bi bilo kako će prevlaka TiN/TiCN biti najdeblja sukladno dobivenim rezultatima u poglavlju trošenja.

Svrkla s prevlakama promjera 4 mm su prerezana na gornjem dijelu drške i potom zaliveni u polimernu masu te pripremljeni za metalografsku analizu, nakon čega su brušeni i polirani. Postupak metalografske analize je obavljen u laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korišten je svjetlosni mikroskop Olympus GX51.

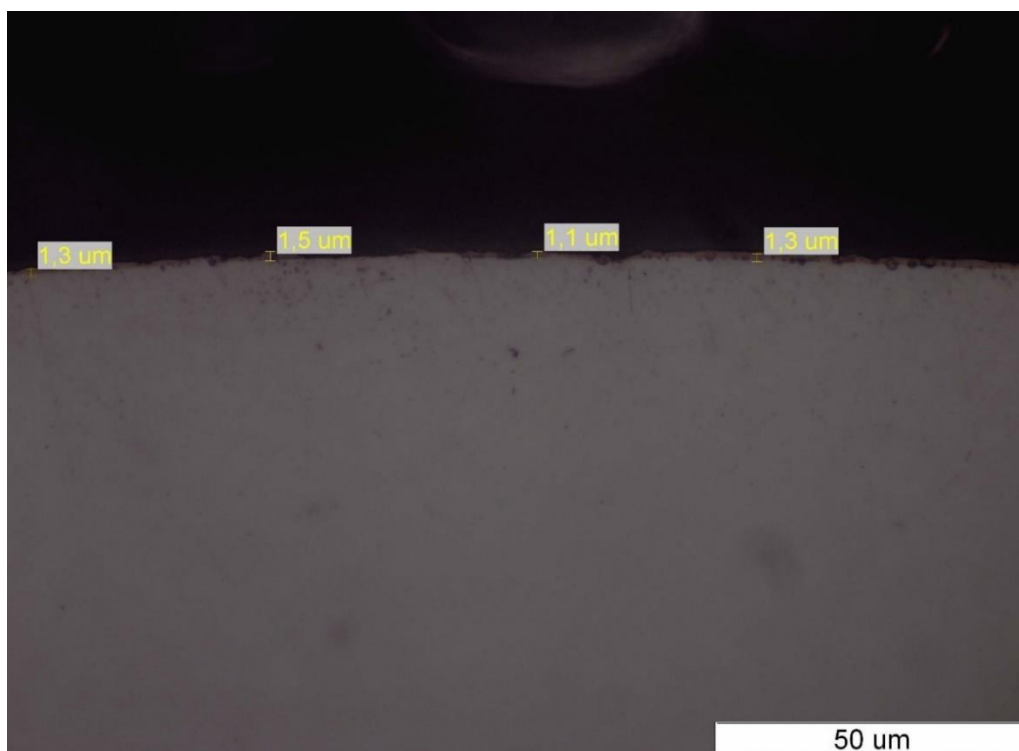


**Slika 41 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51**

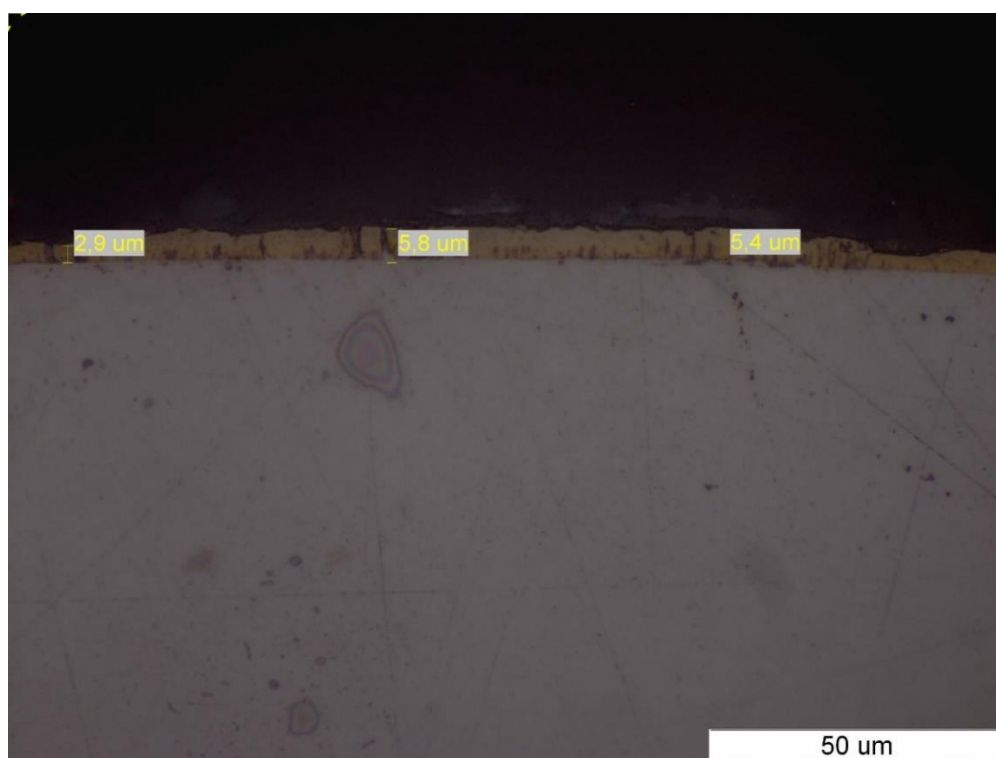
Fotografirane su rubne zone svrdala s prevlakama TiN, TiN/TiCN i TiN/TiBN. Na fotografijama se vide debljine nanesenih prevlaka PACVD tehnologijom.



**Slika 42 Rubna zona s TiN prevlakom**



**Slika 43** Rubna zona s TiN/TiCN prevlakom

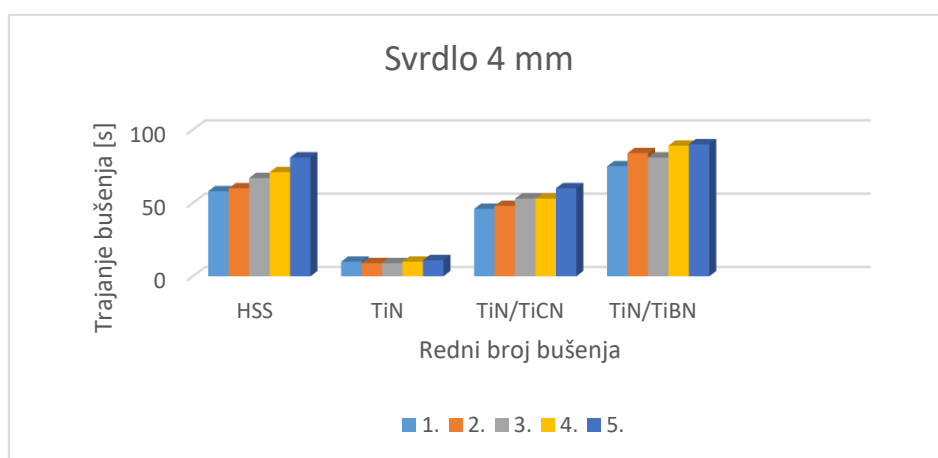


**Slika 44** Rubna zona s TiN/TiBN prevlakom

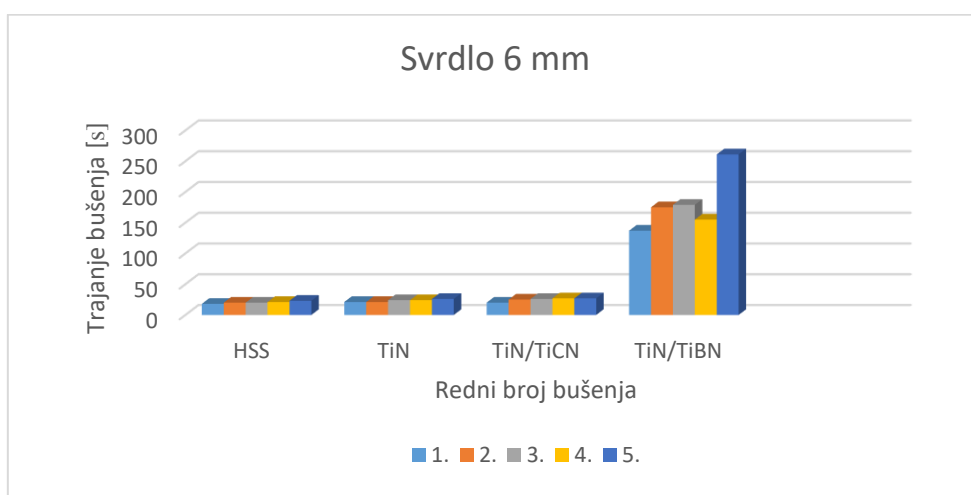
## 9. REZULTATI TROŠENJA SPIRALNIH SVRDLA

### 9.1. Trošenje oštrice svrdla nakon pet izbušenih provrta

Ispitivanje trošenja započinje s bušenjem prve serije provrta. Buši se u puno, materijal obratka je nisko ugljični ne legirani konstrukcijski čelik, poprečnog šupljeg kvadratnog presjeka. U jednakim radnim uvjetima sa svakim svrdlom se buši pet provrta, nakon čega se vrši usporedba. Rezultati ispitivanja prikazani su u prilogima koji se nalaze na kraju ovog rada. Na slikama 53 i 54 možemo vidjeti usporedbu trajanje bušenja svih svrdala.

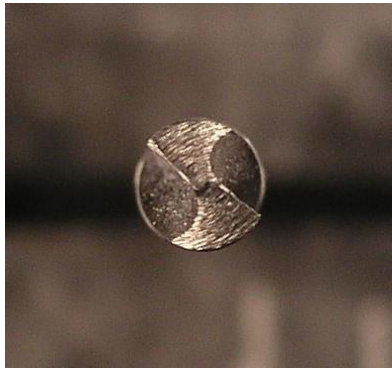
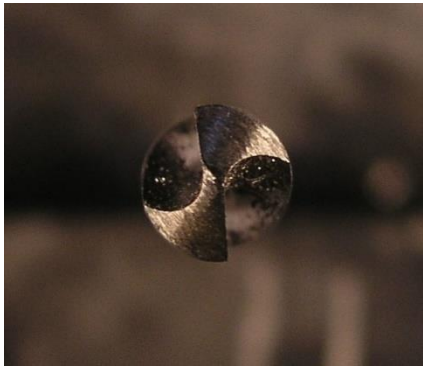

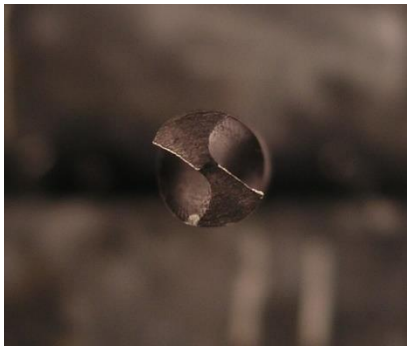


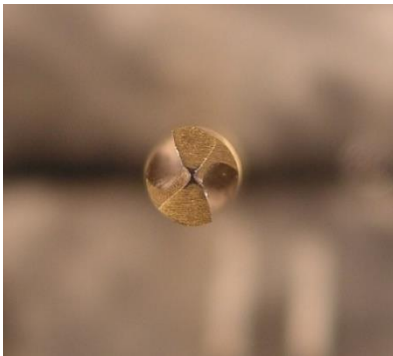
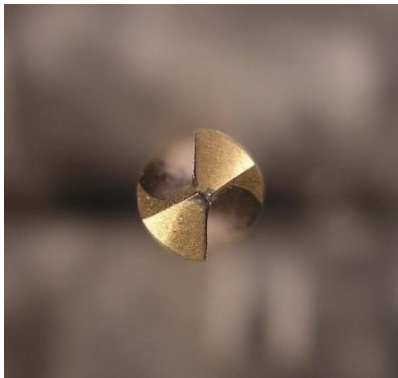


Slika 45 Dijagram trajanja bušenja 1. do 5. provrta za svrdlo 4 mm



Slika 46 Dijagram trajanja bušenja 1. do 5. provrta za svrdlo 6 mm

Tablica 9 Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon pet izbušenih provrta

Materijal	Nazivni promjer svrdla, mm	
	4	6
HSS		
TiCN		
TiBN		
TiN		

Zanimljiv komentar je u usporedbi trajanja bušenja u odnosu na prevlake i dimenzije svrdala. Možemo primijetiti kako je TiN kod 4 mm imao najkraće trajanje bušenja, dok je TiN/TiBN prevlaka kod 6 mm svrdla imala najduže trajanje bušenja. Razlog tome je debljina prevlake kod procesa prevlačenja pri čemu je kod svrdla s TiN/TiBN duže trajanje procesa prevlačenja zagladilo površinu oštrice osnovnog materijala.

U tablici 9 prikazano je stanje rezne oštrice svrdala nakon pet izbušenih rupa u jednakim uvjetima rada. Parametri bušenja nalaze se u prilogima na kraju ovog rada.



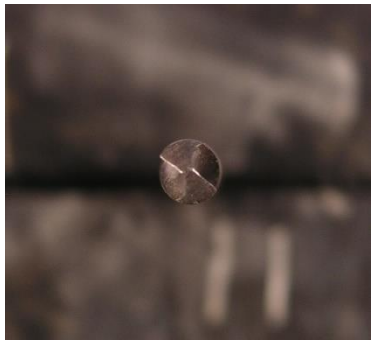



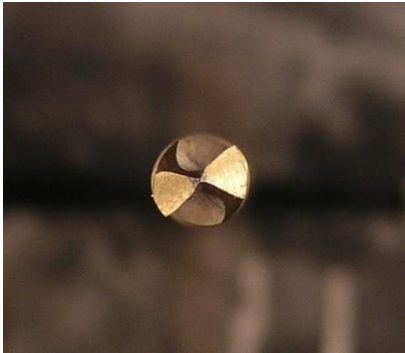

Već nakon prve serije trošenja uzoraka zapažamo značajne razlike između uzoraka. Kod ne prevučenih svrdala 4 mm je primijećeno izrazito trošenje površine. Svrdla s prevlakom TiN poprimaju zaobljen vrh oštrice gdje se primjećuje trošenje prevlake. Najbolje stanje površine ima TiN/TiBN prevlaka 6 mm gdje gotovo nema tragova trošenja. Ovaj primjer nam prikazuje najbolju usporedbu pokusa, gdje vidimo da na slici 53, TiN ima najkraće trajanje bušenja, ali zbog tanke prevlake u tablici 9 vidimo trošenje i uništavanje iste. Suprotno tome na slici 53 uzorak TiN/TiBN ima nešto duže vrijeme bušenja, ali zato u tablici 9 gotovo da i nema tragova trošenja.

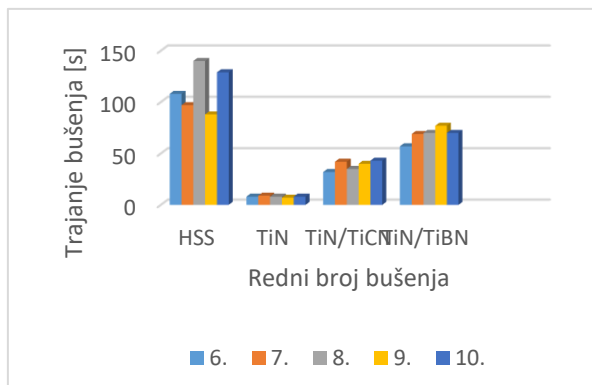
## **9.2. Trošenje oštrice svrdla nakon deset izbušenih provrta**

Slijedeći korak u ispitivanju je nova serija od pet provrta sa svakim svrdlom u jednakim uvjetima rada koji su detaljnije prikazani u prilogima na kraju ovog rada. Nakon bušenja uzorci su slikani i nakon temperiranja na sobnoj temperaturi ponovno su im izmjerene sve dimenzije. U tablici 10 se vidi stanje oštrica nakon deset provrta.

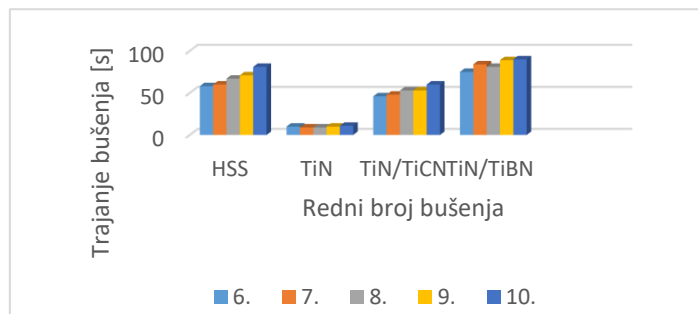


Tablica 10. Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon deset izbušenih provrta

Materijal	Nazivni promjer svrdla, mm	
	4	6
HSS		
TiCN		
TiBN		
TiN		



**Slika 47** Dijagram trajanja bušenja 6. do 10. provrta za svrdlo 4 mm



**Slika 48** Dijagram trajanja bušenja 6. do 10. provrta za svrdlo 6 mm



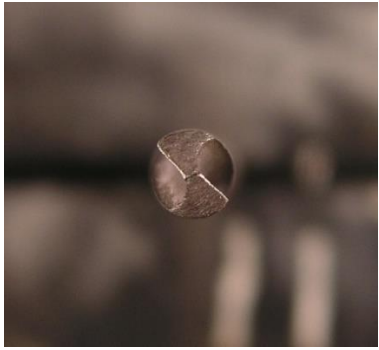



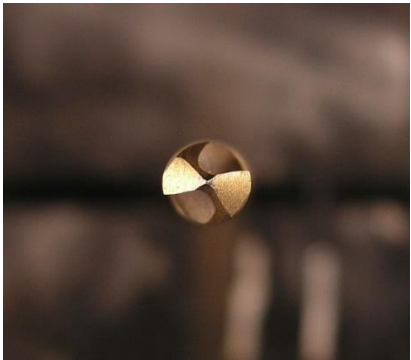
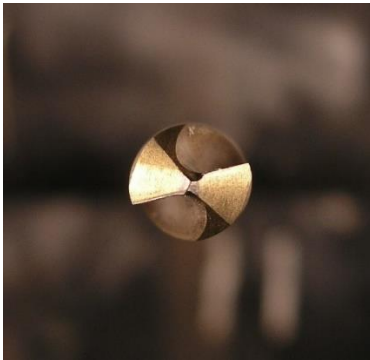
Nakon deset bušenja ne dolazi do progresivnog trošenja nijednog uzorka sa prevlakom. Svrdlo bez prevlake djelomično je potrošeno. Dijagrami trajanja bušenja prikazani su na slikama 56 i 57. Iz dijagrama se lako razlučuje kako nema velike razlike između dimenzija svrdla i brzine trošenja, ali zato je došlo do znatnog povećanja brzine bušenja kod svrdla TiN/TiBN 6 mm, što možemo vidjeti na slici 57. Povećanje brzine od gotovo 50% je uzrok trošenja očigledno predebele prevlake koja sada poprima optimalnu debljinu i radijus rezne oštrice.

### 9.3. Rezultati nakon petnaest provrta

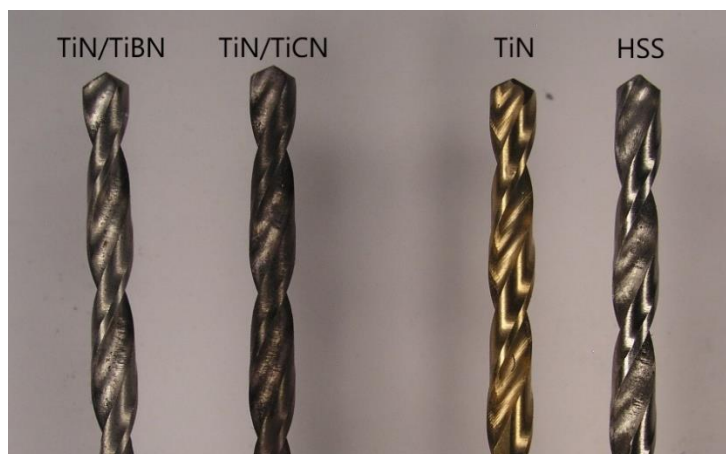
U idućem koraku napravljena je još jedna serija od pet provrta nakon čega je zaključeno da je došlo do progresivne vrijednosti trošenja koja je adekvatnog karaktera za usporedbu prevlaka. Kod ne prevučenog svrdla od 4 mm ispitivanje je završeno nakon 14. provrta jer je došlo do totalnog istrošenja i uništenja reznih oštrica svrdla (tablica 11).



**Tablica 11** Izgled vrha ispitivanih svrdala nakon petnaest izbušenih provrta

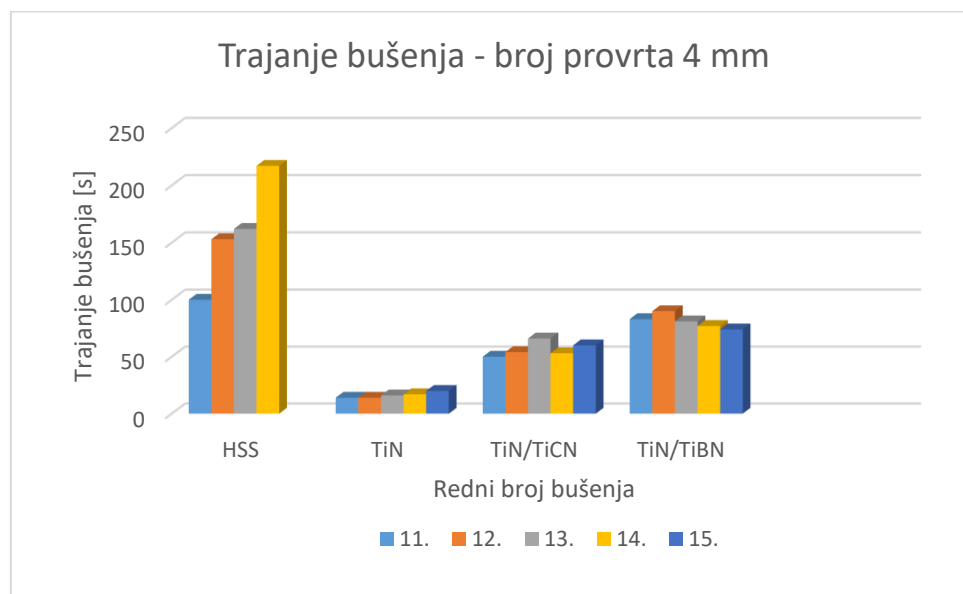
Materijal	Nazivni promjer svrdla, mm	
	4	6
HSS		
TiCN		
TiBN		
TiN		

Iz priloženih slika jako se dobro vidi da je kod ne prevučenog svrdla 4 mm došlo do zaglađenja i poravnanja reznih oštrica. Najbolje stanje površinske oštrice vidljivo je kod uzorka TiN/TiBN 6 mm gdje gotovo da nema oštećenja površine. Dobro stanje prevlake se pokazalo i kod TiN gdje osim trošenja na vrhu nije došlo do daljnje propagacije oštećenja prevlake. Nakon izvršenih petnaest provrta sva svrdla su fotografirana u jednakom položaju iz kojeg se jasno vidi smanjenje vršnog kuta svrdala, slika 49.

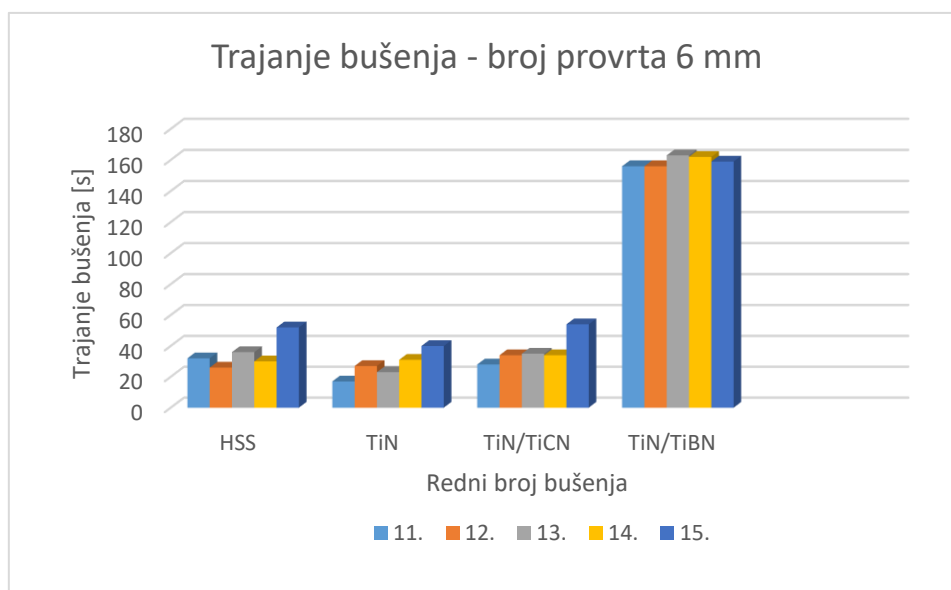


**Slika 49** Prikaz vršnih kutova svrdala nakon 15 izbušenih provrta

Prikazani su odnosi nakon zadnje serije provrta u dijagramima ispod.



**Slika 50** Dijagram trajanja bušenja 11. do 15. provrta za svrdlo 4 mm

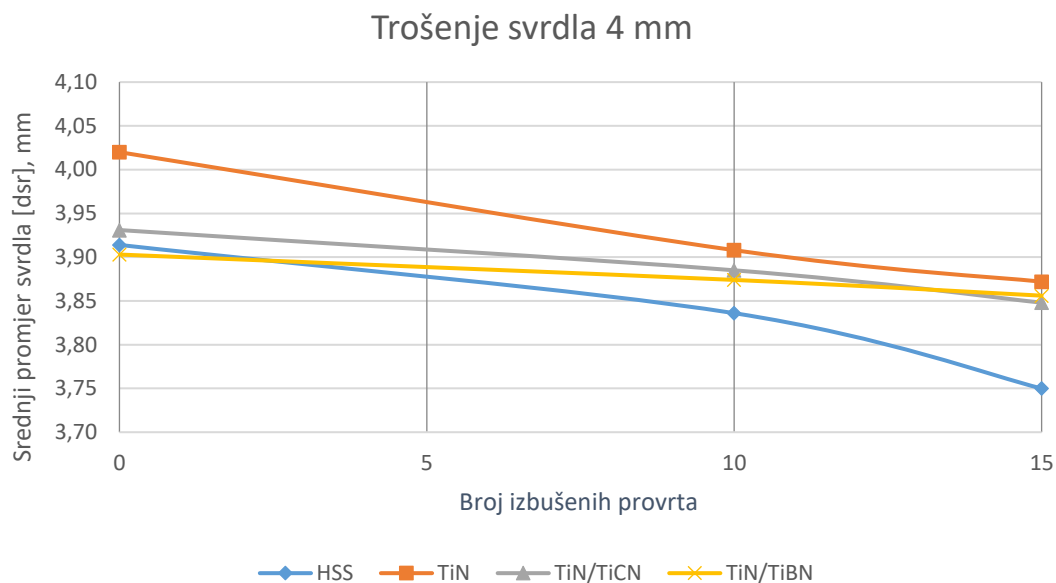


**Slika 51** Dijagram trajanja bušenja 11. do 15. provrta za svrdlo 6 mm

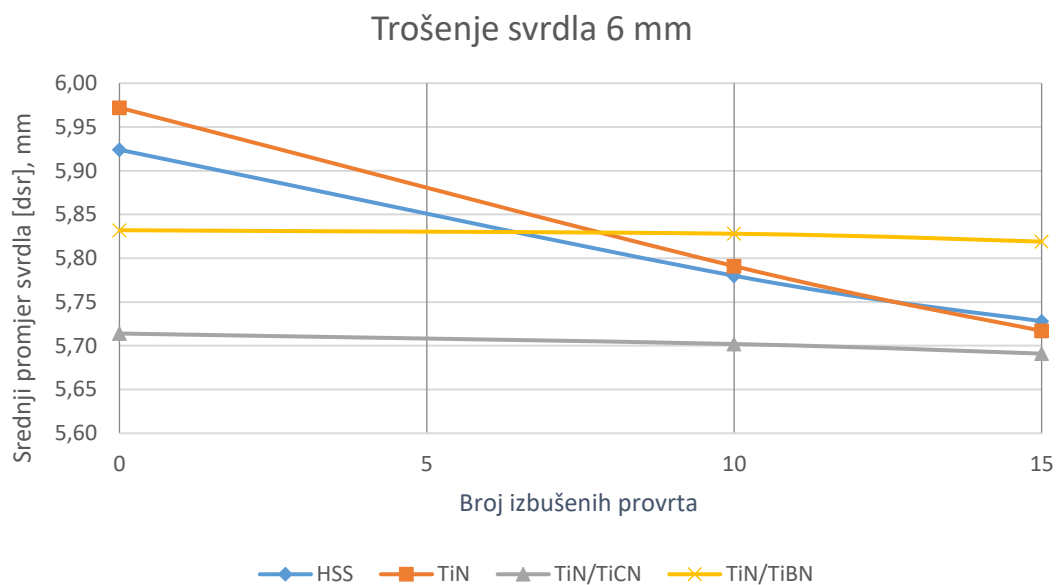
Možemo primijetiti kako je došlo do uništenja ne prevučenog svrdla od 4 mm, a istovremeno je prevlaka kod prevučenih očigledno smanjena na adekvatnu debljinu. Također kod svrdla 6 mm imamo suprotan slučaj gdje bilježimo početak trošenja ne prevučenog, ali TiN/TiBN još uvijek ima predebelu prevlaku, rezultat koje je zaobljena oštrica i duže vrijeme bušenja.

#### 9.4. Diskusija rezultata trošenja

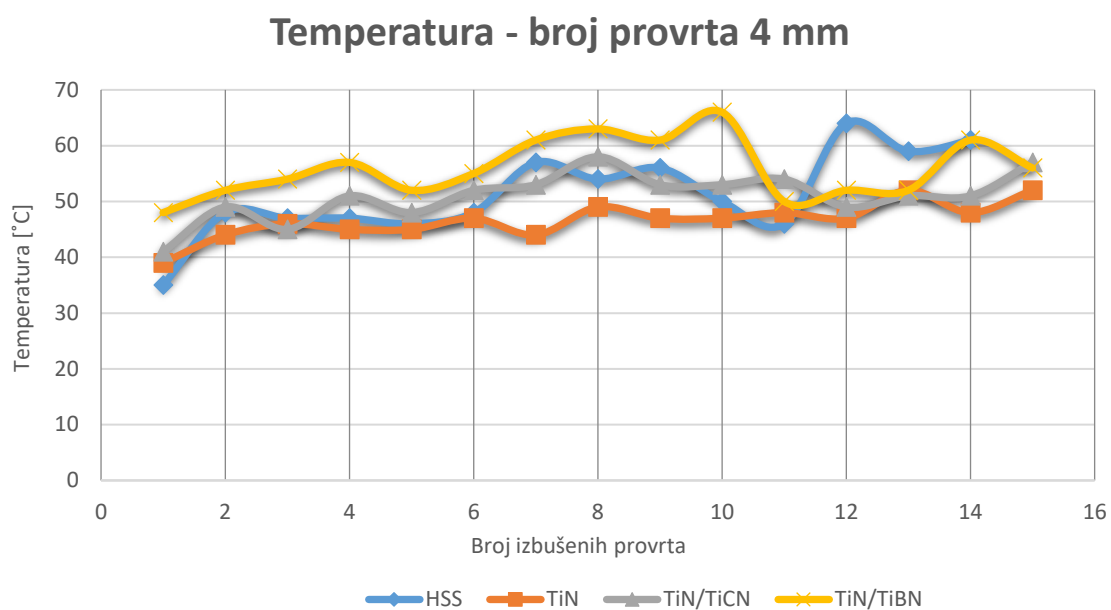
U dijagramima ispod prikazani su odnosi svih mjerenih faktora u odnosu na broj provrta. Najbitniji dijagrami ovih ispitivanja su grafovi izmjerenih srednjih promjera nakon bušenja i njihova promjena dimenzija u ovisnosti o trošenju svrdla, a oni su prikazani ispod.



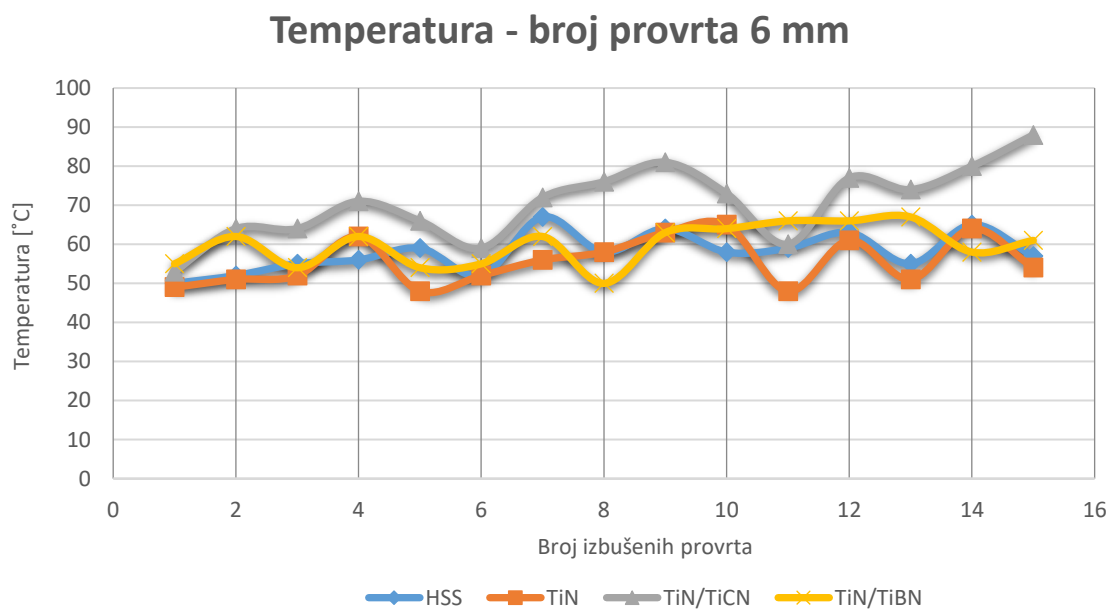
**Slika 52** Dijagram smanjenja srednjeg promjera za 4 mm svrdlo



**Slika 53** Dijagram smanjenja srednjeg promjera za 6 mm svrdlo



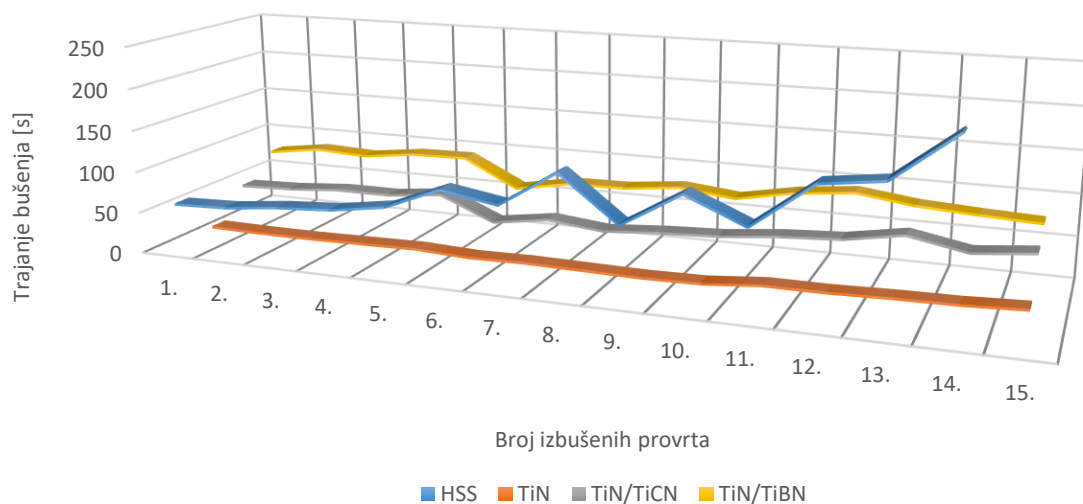
Slika 54 Dijagram promjene temperature za 4 mm svrdlo



Slika 55 Dijagram promjene temperature za 6 mm svrdlo

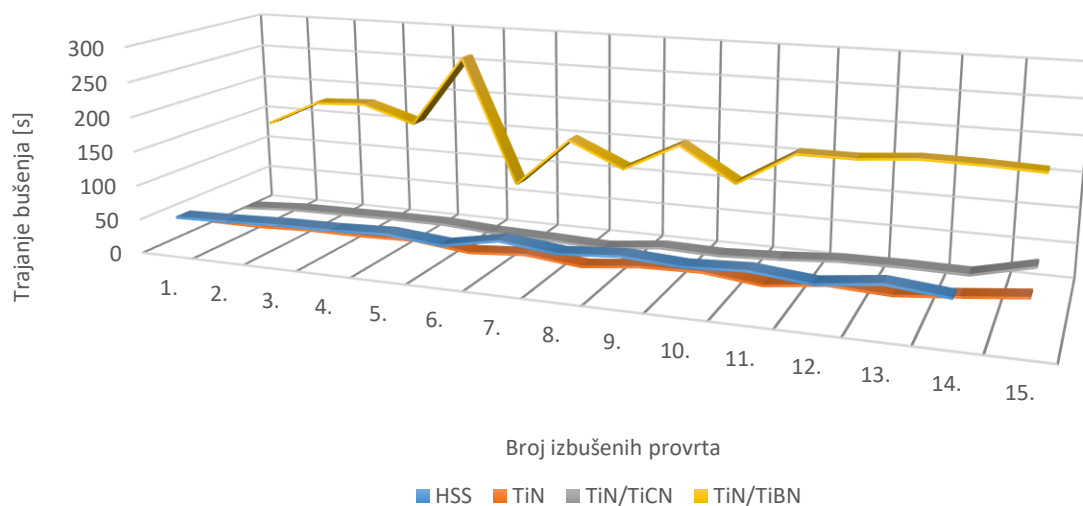
Ukupan prikaz trajanja bušenja u ovisnosti o broju provrta prikazani su u dijagramima ispod.

### Trajanje bušenja - broj provrta 4 mm



**Slika 56** Dijagram trajanja bušenja za 4 mm svrdlo

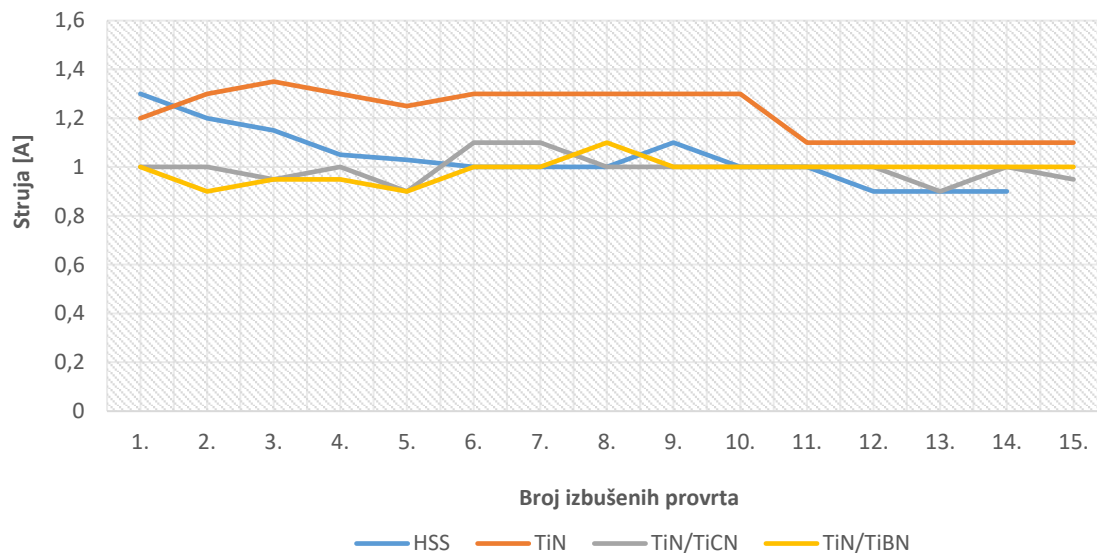
### Trajanje bušenja - broj provrta 6 mm



**Slika 57** Dijagram trajanja bušenja za 6 mm svrdlo

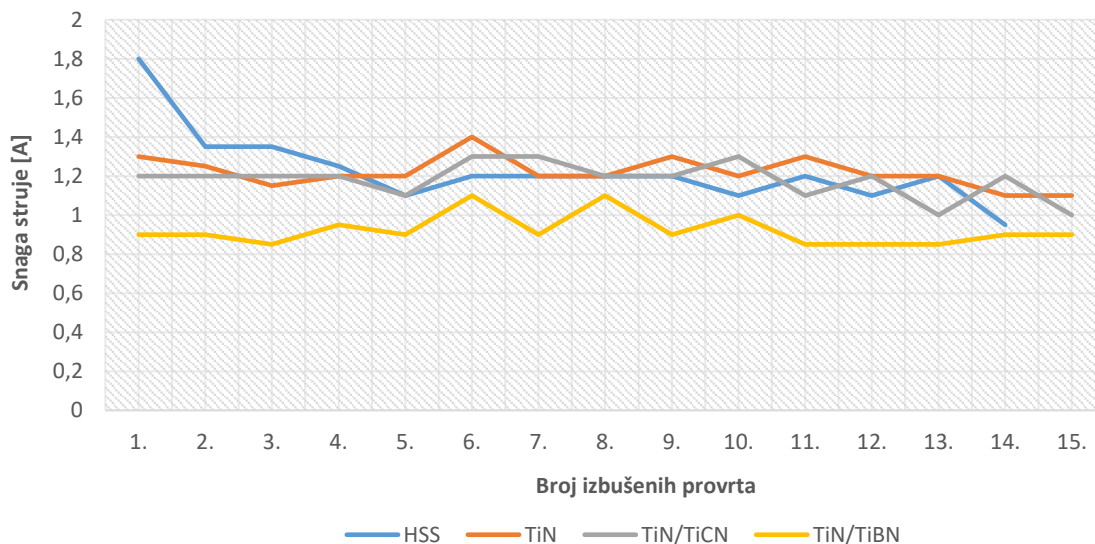
Mjerena je veličina snage struje [A] u odnosu na broj provrta čiji se dijagrami nalaze ispod.

### Jakost struje - broj provrta 4 mm

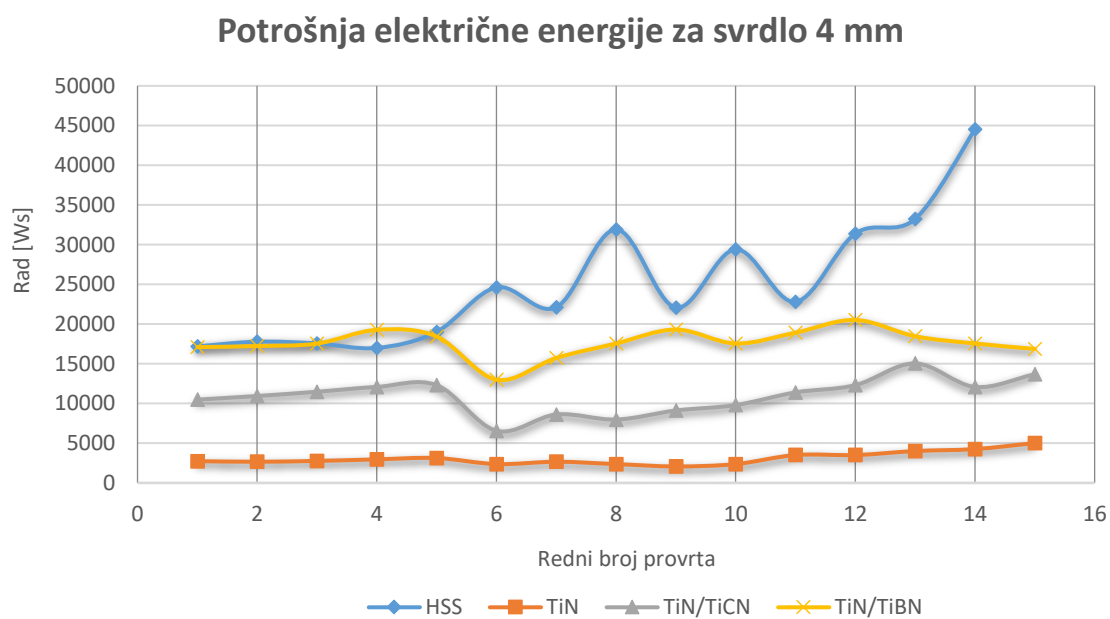


**Slika 58** Promjena jakosti struje za bušenje provrta svrdlom promjera 4 mm

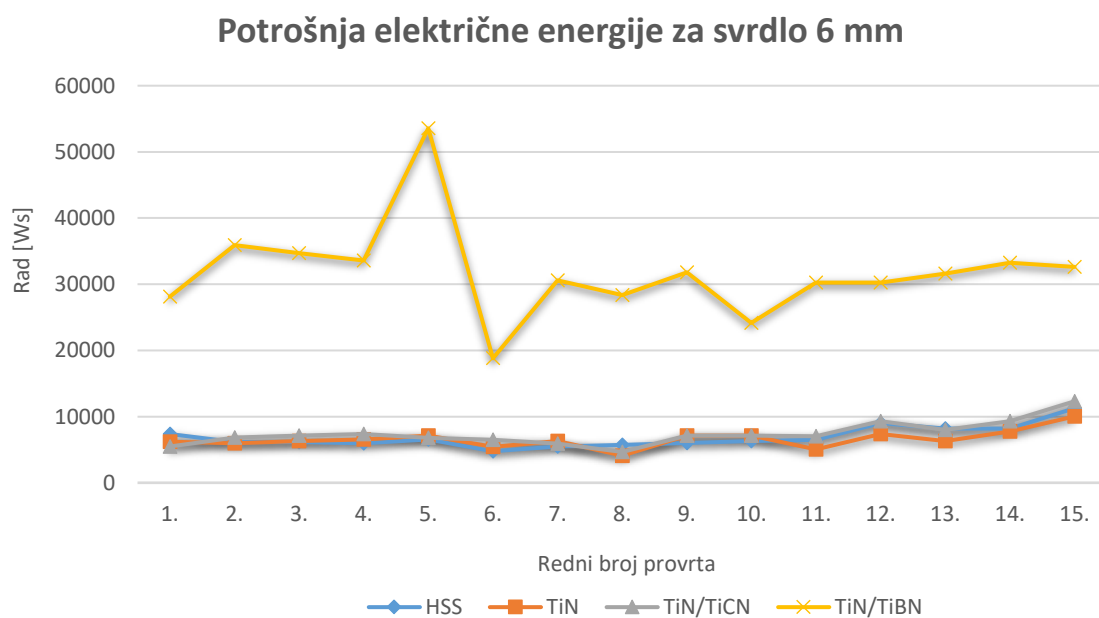
### Jakost struje - broj provrta 6 mm



**Slika 59** Promjena jakosti struje za bušenje provrta svrdlom promjera 6 mm



**Slika 60** Potrošnja električne energije za bušenje provrta svrdlom promjera 4 mm



**Slika 61** Potrošnja električne energije za bušenje provrta svrdlom promjera 6 mm



U provedenim ispitivanjima identificirani su značajno promjenjivi faktori između kojih je moguće odrediti korelacije i veze. U bušenju prvih pet provrta vidljivo je kako je potrošnja materijala i smanjivanje srednjeg promjera svrdla najveće kod ne prevučenog HSS svrdla. Najmanje smanjenje promjera zamjećujemo kod prevlake TiN/TiBN koja ima najveću otpornost na trošenje. Blagi linearni porast temperature primjećujemo kod svih svrdala i promjera, što je naravno rezultat ukupnog posmaka bušenja. Između serija bušenja nije bilo duže stanke za eventualno hlađenje alata.

Kod dijagrama trajanja bušenja potvrđena je pretpostavka o zaobljenju poprečne oštrice svrdla nakon PACVD prevlačenja prevlakom TiN/TiBN. Naime kod TiN/TiBN prevlake od 6 mm došlo je stvaranja deblje prevlake na oštricama svrdla, uslijed predugačkog trajanja prevlačenja u plazmi te je zbog početnog zatupljenja oštrice s ovim svrdlima najduže trajao postupak bušenja. U budućim ispitivanjima reznih oštrica svrdla treba optimirati debljinu prevlake i broj slojeva za konkretni rezni alat.

Korištena bušilica ima sustav automatske regulacije snage koji osigurava stalni broj okretaja te time uklanja moguću povećanu potrošnju električne energije. Najmanja snaga je evidentirana kod prevlake TiN/TiBN iz zato što kod nje nije došlo to trošenja prevlake koja bi uzrokovala povećani koeficijent trenja u sustavu. Iz mjerenih vrijednosti u zadnjem setu dijagrama prikazan je izračunat rad, odnosno potrošnja električne energije. Zanimljivo je kako pomoću tog dijagrama možemo utvrditi trošenje rezne oštrice u slučaju kad dođe do povećane potrošnje električne energije. Još jedna činjenica se može utvrditi kod dijagrama svrdla 6 mm kod prevlake TiN/TiBN gdje se vidi pad potrošnje nakon što se potrošio prekomjerni sloj prevlake na reznom alatu.

## 10. ZAKLJUČAK

Industrijska proizvodnja svakodnevno zahtjeva povećavanje trajnosti reznih oštrica svrdla, odnosno produljenje vremena između oštrenja ili zamjene svrdla. U tribološkom sustavu spiralno svrdlo – obradak dolazi do pojave povišenih temperatura, mehaničkih naprezanja, trošenja svrdla, pojave buke i vibracija. Pojave trošenja svrdla zajedno s povišenjem temperature reznih oštrica najznačajnije doprinose skraćanju vremena između oštrenja ili zamjene svrdla. U cilju smanjenja trošenja svrdla se prevlače tvrdim tribološkim prevlakama nitrida, borida i karbida.

U radu je uspoređeno trošenje spiralnog svrdla s i bez prevlaka. Ispitano je trošenje spiralnih svrdla promjera 4 i 6 mm pri bušenju nisko ugljičnog nelegiranog čelika. Svrkla su bila prevučena prevlakama PVD TiN, PACVD TiN/TiCN i PACVD TiN/TiBN. Kao pokazatelji trošenja mjerena je promjena promjera vrha svrdla, promjena duljine svrdla, vizualni izgled oštrice svrdla, trajanje bušenja, temperatura vrha svrdla na kraju bušenja i potrošnja električne energije. Iz rezultata ispitivanja trošenja zaključuje se sljedeće:

- Najmanju otpornost na trošenje tijekom bušenja 15 provrta pokazala su ne prevučena svrdla .
- Svrkla prevučena prevlakom PVD TiN pokazala su smanjenje promjera vrha svrdla slično ne prevučenim svrdlima, ali zbog boljeg očuvanja geometrije reznih oštrica trajanje bušenja je bilo značajno kraće i ova svrdla mogu izdržati bušenje više od 15 provrta.
- Kod svrdla prevučenih PACVD prevlakama uočeno je vrlo malo smanjenje promjera vrha svrdla, odnosno vrlo malo trošenje nakon 15 izbušenih provrta. No kod oba ispitivana skupa uzoraka vrijeme bušenja bilo je značajno duže u odnosu na svrdla prevučena prevlakom PVD TiN. Ovo produljenje vremena bušenja posljedica je zaobljenja poprečne oštrice svrdala isparivanjem u plazmi i nanošenjem deblje PACVD prevlake.
- Kod svih trošenih svrdala uočeno je povišenje temperature vrha svrdla i povećanje potrošnje električne energije s povećanjem broja izbušenih provrta.

U budućim istraživanjima treba optimirati parametre PACVD prevlačenja svrdla u cilju dobivanja tanke i na trošenje otporne prevlake koja neće promijeniti geometriju oštrice.

## PRILOZI

1. CD-R disk
2. Tablice s rezultatima svih mjerenih parametara

**Tablica 12      Rezultati ispitivanja svrdla HSS**

Vrsta prevlake	HSS - 4 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	35	1000	1,3	58
2	48	1000	1,3	60
3	47	1000	1,15	67
4	47	1000	1,05	71
5	46	1000	1,03	81
6	48	1000	1	108
7	57	1000	1	97
8	54	1000	1	140
9	56	1000	1,1	88
10	50	1000	1	129
11	46	1000	1	100
12	64	1000	0,9	153
13	59	1000	0,9	162
14	61	1000	0,9	217
15	/	1000	0,9	/
Vrsta prevlake	HSS - 6 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	50	1000	1,8	18
2	52	1000	1,35	20
3	55	1000	1,35	20
4	56	1000	1,25	21
5	59	1000	1,25	23
6	52	1000	1,1	19
7	67	1000	1,2	20
8	58	1000	1,2	21
9	64	1000	1,2	22
10	58	1000	1,2	23
11	59	1000	1,1	32
12	63	1000	1,2	26
13	55	1000	1,1	36
14	65	1000	1,2	30
15	57	1000	0,95	52

**Tablica 13      Rezultati ispitivanja svrdla TiN**

Vrsta prevlake	TiN - 4 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	39	1000	1,2	10
2	44	1000	1,3	9
3	46	1000	1,35	9
4	45	1000	1,3	10
5	45	1000	1,25	11
6	47	1000	1,3	8
7	44	1000	1,3	9
8	49	1000	1,3	8
9	47	1000	1,3	7
10	47	1000	1,3	8
11	48	1000	1,1	14
12	47	1000	1,1	14
13	52	1000	1,1	16
14	48	1000	1,1	17
15	52	1000	1,1	20
Vrsta prevlake	TiN - 6 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	49	1000	1,3	21
2	51	1000	1,25	21
3	52	1000	1,15	24
4	62	1000	1,2	24
5	48	1000	1,2	26
6	52	1000	1,4	17
7	56	1000	1,2	23
8	58	1000	1,2	15
9	63	1000	1,3	24
10	65	1000	1,2	26
11	48	1000	1,3	17
12	61	1000	1,2	27
13	51	1000	1,2	23
14	64	1000	1,1	31
15	54	1000	1,1	40

**Tablica 14      Rezultati ispitivanja svrdla TiN/TiCN**

Vrsta prevlake	TiN/TiCN - 4 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	41	1000	1	46
2	49	1000	1	48
3	45	1000	0,95	53
4	51	1000	1	53
5	48	1000	0,9	60
6	52	1000	1,1	32
7	53	1000	1,1	42
8	58	1000	1	35
9	53	1000	1	40
10	53	1000	1	43
11	54	1000	1	50
12	49	1000	1	54
13	51	1000	0,9	66
14	51	1000	1	53
15	57	1000	0,95	60
Vrsta prevlake	TiN/TiCN - 6 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	53	1000	1,2	20
2	64	1000	1,2	25
3	64	1000	1,2	26
4	71	1000	1,2	27
5	66	1000	1,1	27
6	59	1000	1,3	22
7	72	1000	1,3	20
8	76	1000	1,2	17
9	81	1000	1,2	26
10	73	1000	1,3	24
11	60	1000	1,1	28
12	77	1000	1,2	34
13	74	1000	1	35
14	80	1000	1,2	34
15	68	1000	1	54

**Tablica 15      Rezultati ispitivanja svrdla TiN/TiBN**

Vrsta prevlake	TiN/TiBN - 4 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	48	1000	1	75
2	52	1000	0,9	84
3	54	1000	0,95	81
4	57	1000	0,95	89
5	52	1000	0,9	90
6	55	1000	1	57
7	61	1000	1	69
8	63	1000	1,1	70
9	61	1000	1	77
10	66	1000	1	70
11	50	1000	1	83
12	52	1000	1	90
13	52	1000	1	81
14	61	1000	1	77
15	56	1000	1	74
Vrsta prevlake	TiN/TiBN - 6 mm			
Broj provrta	Temperatura [°C]	Broj okretaja [min]	Snaga mreže [A]	Vrijeme bušenja [min]
1	55	1000	0,9	137
2	62	1000	0,9	175
3	54	1000	0,85	179
4	62	1000	0,95	155
5	54	1000	0,9	261
6	55	1000	1,1	75
7	62	1000	0,9	149
8	50	1000	1,1	113
9	63	1000	0,9	155
10	64	1000	1	106
11	66	1000	0,85	156
12	66	1000	0,85	156
13	67	1000	0,85	163
14	58	1000	0,9	162
15	61	1000	0,9	159

**Tablica 16 Promjena dimenzija ne prevučenog svrdla promjera 4 mm (HSS)**

Vrsta prevlake	HSS - 4 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	3,992	3,788	3,961	3,914	74,6
10	3,86	3,762	3,885	3,836	74,56
15	3,771	3,72	3,758	3,75	74,52

**Tablica 17 Promjena dimenzija ne prevučenog svrdla promjera 6 mm (HSS )**

Vrsta prevlake	HSS - 6 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	5,995	5,78	5,996	5,924	92,38
10	5,925	5,695	5,72	5,78	92,36
15	5,65	5,65	5,695	5,728	92,12

**Tablica 18 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN 4 mm**

Vrsta prevlake	TiN - 4 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	5,995	5,78	5,996	5,924	92,38
10	5,925	5,695	5,72	5,78	92,36
15	5,65	5,65	5,695	5,728	92,12

**Tablica 19 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN 6 mm**

Vrsta prevlake	TiN - 6 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	6,001	5,975	5,94	5,972	92,76
10	5,945	5,793	5,635	5,791	92,72
15	5,868	5,765	5,518	5,717	92,66

**Tablica 20 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiCN 4 mm**

Vrsta prevlake	TiN/TiCN - 4 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	4,019	3,988	4,053	4,02	74,1
10	3,955	3,778	3,992	3,908	74
15	3,912	3,74	3,964	3,872	73,96

**Tablica 21 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiCN 6 mm**

Vrsta prevlake	TiN/TiCN - 6 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	5,905	5,665	5,571	5,714	92,2
10	5,895	5,65	5,56	5,702	92,2
15	5,882	5,639	5,552	5,691	92,2

**Tablica 22 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiBN 4 mm**

Vrsta prevlake	TiN/TiBN - 4 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	4	3,862	3,848	3,903	73,94
10	3,997	3,806	3,82	3,874	73,94
15	3,995	3,76	3,814	3,856	73,92

**Tablica 23 Promjena dimenzija svrdla s prevlakom TiN/TiBN 6 mm**

Vrsta prevlake	TiN/TiBN - 6 mm				
Broj provrta	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	dsr [mm]	L [mm]
0	5,988	5,768	5,741	5,832	92,5
10	5,978	5,768	5,738	5,828	92,46
15	5,975	5,765	5,718	5,819	92,46

**Tablica 24 Konstantne vrijednosti tijekom ispitivanja**

Sila bušenja [N]	Debljina obratka [mm]	Napon struje [V]	Početna temperatura [°C]
100	3 mm +/- 0,1 mm	228	28



## LITERATURA

- [1] Dr. sc. Darko Landek, izv. prof. : Alatni materijali, autorizirane podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015
- [2] <https://www.fsb.unizg.hr/kas>, Autorizirana predavanja, Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem čestica, FSB, 2015.
- [3] S. Škorić: Autorizirana predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010
- [4] <http://www.mechanicalengineeringblog.com/4597-drilling-machine-operations-functions-of-a-drilling-machine> , 09.04.2018.
- [5] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2016.
- [6] K. Grilec, S. Jakovljević: "Tribologija", autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2015
- [7] Pavić, A.: Tehnologija – Obrada odvajanjem čestica, Veleučilište u Karlovcu, 2013.
- [8] Š. Šavar, Obrada odvajanjem čestica II dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1978.
- [9] <http://in-ved.blogspot.hr/2010/08/> 20.04.2018.
- [10] Bartolin, I: Utjecaj trošenja alata i parametara obrade na raslojavanje pri bušenju kompozitnih materijala, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] <http://www.iscar.com> 21.04.2018.
- [12] Udiljak, T.: Trošenje i postojanost reznih alata, FSB, Zagreb, 2009.
- [13] Predavanja Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem, dio Obrada odvajanjem, 2009, FSB Zagreb, dr.sc. Damir Ciglar
- [14] <http://www.dsgundrill.com/tool/tool8.asp?ch=8> 21.04.2018.
- [15] <http://technidrillsystems.com/gundrill/> 21.04.2018.
- [16] <http://prodso.com/deep-hole-drilling/what-is-ejector-drilling/> 21.04.2018.
- [17] <http://www.gsmdrilling.com> 21.04.2018.
- [18] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2002.

- [19] <http://www.americanmachinist.com/cutting-tools/cutting-tool-applications-chapter-9-drilling-methods-and-machines> , 10.05.2018.
- [20] B. Matijević, M. Stupnišek; Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala; Zbornik radova znanstveno stručnog skupa s međunarodnim učešćem, Zagreb, 2000.
- [21] M. Gojić; Površinska obradba materijala, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Sisak, 2010.
- [22] B. Matijević: Modificiranje i prevlačenje površina, autorizirana predavanja, FSB, 2016
- [23] T. Filetin, K. Grilec: Postupci modificiranja i prevlačenja površina. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [24] Raidenbach, F.: „ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering”, ASM International, Metals Park, Ohio, SAD, 1994.
- [25] <http://www.titaniumexposed.com/titanium-nitride-coating.html> 31.05.2018.
- [26] W. Schintlmeister, O. Pacher, J. Vac. Sci. Technol. 12 (1975) 7437
- [27] B. Rother, J. Vetter, Plasmabeschichtungsverfahren und Hartstoffschichten, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, 1992.
- [28] W.-D. Münz, J. Vac. Sci. Technol. A 4 (6) (1986) 2717.
- [29] F. Cajner, B. I. Kumić, S. Kovačić, M. Cingesar, Publikacija ARISE projekta, FSB, Zagreb, 2014.
- [30] <https://www.nabava.net/busilice-i-odvijaci/bosch-pbd-40-busilica-cijena-5998741> 25.06.2018.